

IMPACT DES EAUX SOUTERRAINES SUR LE PATRIMOINE BATI

Olivier FOUCHÉ^{1,2}, LEESU (CEREVE-LGUEH), UMR-MA 102,
Université Paris-Est et AgroParisTech

1. Conservatoire national des Arts et Métiers, 2, rue Conté, 75003 Paris Cedex
Tél : 01 40 27 24 27.
2. Ecole des Ponts, 6 et 8 avenue Blaise Pascal, Cité Descartes, 77455 Marne la
Vallée Cedex 2.

Courriel : olivier.fouche@cnam.fr

Résumé

Dans les relations entre la ville et les eaux naturelles, l'attention des gestionnaires et des scientifiques a été focalisée par l'impact de l'urbanisation sur les eaux de surface, en particulier l'aggravation du pic de ruissellement et la détérioration de la qualité des cours d'eau due au lessivage des surfaces urbaines et aux rejets. Cependant, l'urbanisation affecte aussi la recharge des aquifères (terrains poreux et perméables, i.e. aptes à l'écoulement de l'eau souterraine, au rôle de réserve naturelle d'eau douce), et ceci de deux façons : 1. en changeant les chemins et les taux de recharge ; 2. en modifiant la qualité des eaux de recharge.

Ainsi naissent des perturbations du niveau piézométrique et du régime d'écoulement souterrain qui sont à la fois complexes et différées par rapport à leurs causes. En effet, les constantes contrôlant la réponse hydraulique des aquifères sont les plus grandes parmi toutes les composantes du cycle hydrologique : l'atteinte d'un nouvel équilibre peut prendre des années. Les changements seulement passés en revue ici sont relatifs à l'état et à l'usage antérieur du sol et sont difficiles à quantifier. Mais on décrira surtout leur effet boomerang : le changement hydrogéologique impacte l'urbanisation elle-même et plus précisément la stabilité et l'intégrité des structures et des installations. Parmi les structures affectées par la remontée de nappe, on trouve les fondations et les espaces souterrains des bâtiments, les chaussées, tunnels routiers et tranchées couvertes, les équipements d'assainissement comme les collecteurs, stations de relevage, puisards, fosses sseptiques, etc. Le battement de nappe engendre des sollicitations cycliques qui dégradent les structures souterraines et produisent par exemple l'entrée d'eaux claires parasites dans les réseaux et l'inondation des parkings.

On doit désormais envisager la situation où la nappe (masse d'eau souterraine) principale s'élève à tel point que si tous les pompages d'alimentation cessaient (réduction de la demande en période de crise économique, qualité diminuée en dessous du tolérable), le niveau piézométrique dépasserait le niveau antérieur au développement industriel. Tendant vers cette situation extrême, on assiste déjà à une remontée générale de la nappe dans certains secteurs urbanisés comme la Seine-Saint-Denis. C'est pourquoi une cartographie du risque remontée de nappe est en train de se développer. Au-delà, la remontée de nappe aggrave les autres risques naturels. Un haut niveau de nappe implique une grande sensibilité aux extrêmes

climatiques, une pluviométrie très forte engendrant des inondations par crue de nappe, inondations par en-dessous pouvant affecter des ouvrages souterrains dans un premier temps, puis la surface urbaine. La sécheresse suivie du retour à une forte teneur en eau dans le sol provoque l'aléa de retrait-gonflement dans les zones riches en argiles, aléa qui affecte l'ensemble du patrimoine bâti. L'eau souterraine atteignant des niveaux géologiques sensibles à la dissolution ou des cavités naturelles préexistantes provoque affaissements et effondrements.

Les pathologies observées sur les ouvrages de génie civil incluent des désordres dans la structure et des défauts dans le dispositif de protection de l'ouvrage à l'égard de l'eau (étanchéité, drainage). Ces désordres réduisent de façon imprévue la durabilité des matériaux et des structures et finalement la durée de vie de l'ouvrage. Ils apparaissent souvent dès la période des travaux, mais parfois longtemps après la mise en service. Quand on cherche à les expliquer a posteriori, on s'aperçoit que les désordres sont souvent liés à une mauvaise exécution de l'ouvrage, parfois dus à un dimensionnement insuffisant, plus rarement à une évolution du terrain ou des conditions d'exploitation qui sont en fait prévisibles en termes de gestion. Pour faire face aux risques associés à la remontée de nappe, entretien et surveillance des ouvrages sont les maîtres mots. Le développement de techniques d'auscultation des ouvrages et de diagnostic, de procédures d'inspection, de recensement et d'évaluation des réparations exigées, est une nécessité urgente dans l'objectif de la conservation du patrimoine bâti.

Mots-Clés : *nappe, recharge, risque, désordres, diagnostic.*

1. Introduction

Le patrimoine bâti subit en sa partie émergée l'épreuve du temps au double sens de son âge et des intempéries de l'atmosphère. Mais il est aussi victime, dans ses fondations en sous-sol, des fluctuations d'humidité du terrain. Cette variabilité de la teneur en eau s'exprime à travers deux aléas naturels qui affectent le bâti : la sécheresse et l'inondation par *crue de nappe*. Ces deux aléas s'expriment dans le terrain ou à sa surface suite au fonctionnement naturel du cycle de l'eau et sont en relation directe avec l'aléa climatique. Un aléa moins fréquent et moins connu est la *remontée tendancielle de nappe* consécutive à la désindustrialisation. C'est cet aléa d'origine anthropique, qui est une phase transitoire vers un nouvel équilibre, que nous présentons à partir d'exemples en le différenciant de la crue de nappe.

Le cas type de la remontée de nappe est l'ennoyage des terrains miniers exploités en galeries souterraines, consécutif à l'arrêt de l'activité. Il conduit par différents mécanismes à l'accroissement des surfaces subissant l'inondation ou susceptibles d'être inondées dans des zones souvent très peuplées. L'exemple moins connu que nous traitons ensuite est celui d'un département qui avait une forte concentration industrielle avant de subir depuis une trentaine d'années une reconversion vers les usages immobiliers, la Seine-Saint-Denis. On rappelle ensuite sur un cas-type de projet de construction les dispositions prises vis-à-vis de l'aléa crue de nappe associé à l'onde de crue dans la vallée de la Seine. Enfin, on envisage succinctement la problématique des eaux parasites dans les réseaux d'assainissement.

Depuis la crue de nappe dans la vallée de la Somme en 2001, on s'attend à l'inondation... par en-dessous. Le BRGM a alors entrepris une cartographie de vulnérabilité à cet aléa couvrant le territoire national à l'échelle 1 / 100 000. Si les effets en surface sont les mêmes qu'une inondation classique, la crue de nappe se manifeste d'abord par l'inondation des espaces

souterrains. Mais en termes d'occurrence et de prévision, on peut la relier à l'estimation hydroclimatique et elle devrait rester exceptionnelle.

On va voir que la remontée tendancielle de la nappe se manifeste de la même façon mais n'obéit pas au même moteur. Ce phénomène, observé jusqu'ici surtout dans les régions en phase de désindustrialisation, aggrave le risque d'inondation par rapport au risque estimé sur les critères hydroclimatiques. En effet, le niveau de référence sur lequel sont basées ces prévisions n'est plus constant : il s'élève depuis le moment où l'on a fait l'estimation.

Les enjeux sont déjà importants et le seront de plus en plus car la désindustrialisation guette un nombre croissant de villes, non à cause des délocalisations tant invoquées depuis deux décennies mais en raison de choix politiques et financiers qui sont faits dans le cadre de la crise économique généralisée du système capitaliste. En cette période où les robinets financiers vont se fermer, il est de toute première importance de continuer à défendre une conception de gestion durable de l'eau et de ses impacts.

2. L'ennoyage minier en Lorraine, cas-type de remontée de nappe

Dans cette section, on présente un exemple de mesures envisagées pour remédier à une situation où des désordres sont infligés à un *quartier existant* par une remontée de nappe. La cessation de l'exploitation minière souterraine dans le bassin ferrière lorrain et l'arrêt consécutif des pompages d'exhaure ont entraîné une remontée rapide du niveau d'ennoyage du réservoir minier et, dans un secteur particulier de la vallée de l'Orne, une hausse sensible de la cote piézométrique de la nappe alluviale. Des arrivées d'eau ont alors été observées, voire l'inondation franche, dans les sous-sols de certaines maisons.

2.1 Contexte géomorphologique et hydrogéologique de l'aléa

L'exploitation industrielle du gisement de minerai de fer a commencé en 1877 et la dernière mine a cessé l'extraction en juin 1994 et toute activité en juin 1997. Pendant 120 ans, l'extraction a été menée par la méthode des chambres et piliers, sans dépilage quand il était nécessaire d'éviter les affaissements du fait de l'occupation de la surface (zones urbanisées, infrastructures), avec dépilage dans le cas contraire.

Après l'arrêt des pompages d'exhaure en 1995-1996, il a fallu moins de 3 ans pour que le réservoir minier, d'un volume estimé à près de 234 millions de m³, de la partie méridionale (dite bassin Sud) du bassin de Longwy-Briey, déborde le 28 octobre 1998 par l'ancienne galerie minière de Moyeuvre qui avait été aménagée à cette fin. Ce débordement a été précédé à partir du mois d'août par des venues d'eau dans les sous-sols enterrés d'une soixantaine d'habitations situées en partie basse de l'agglomération de Moyeuvre-Grande (département de la Moselle), traversée par la rivière Orne (figure 1).

Huit puits de pompage à gros débit ont été réalisés dans le secteur affecté, associés à la mise en place de pompes de surface individuelles dans chaque cave inondée. Mais cette mesure palliative de rabattement de nappe n'a pas permis de résoudre le problème de façon satisfaisante à long terme sur les plans technique et financier.

De plus, les désordres constatés et la sensibilité du système hydrogéologique local ont conduit à la nécessité de sécuriser aussi le débordement du bassin sud qui ne disposait que d'un seul exutoire par une ancienne galerie minière dont le risque d'effondrement à moyen terme ne pouvait pas être écarté.

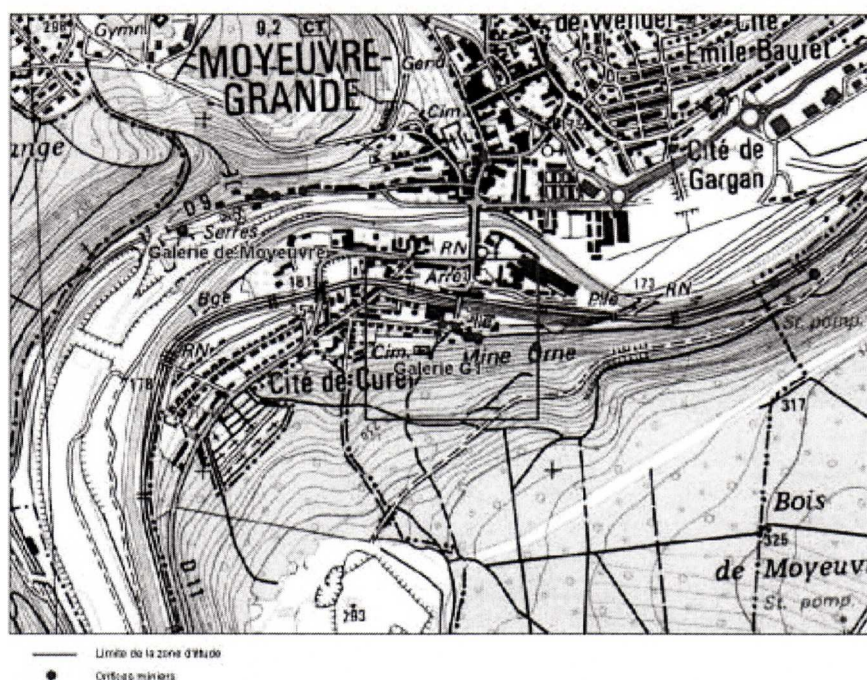


Figure 1 : Localisation du secteur affecté dans l'agglomération de Moyeuvre-Grande (l'Orne s'écoule du sud-ouest vers le nord-est).

La morphologie du secteur est marquée par la vallée encaissée de l'Orne qui se jette à contre-pendage dans la vallée de la Moselle, entaillant ainsi le relief de *cuesta* caractéristique de l'Est du Bassin de Paris. La partie basse de la ville est située en rive droite de l'Orne et occupe la convexité d'une boucle de la rivière, donc la partie sud de la plaine alluviale du lit majeur. La cote du terrain naturel dans la vallée descend de 178 m à 172 m d'amont en aval du site.

Les formations géologiques de couverture sont des remblais superficiels de 0,50 m à 3,50 m d'épaisseur, des alluvions modernes argileuses de 0,50 m à 2,50 m d'épaisseur, et des alluvions modernes grossières d'une épaisseur de 0,90 à 4,10 m inversement proportionnelle à celle des alluvions argileuses. Le substratum géologique est constitué en amont par la base de la formation ferrifère, et en aval par les grès sous-jacents à une cote comprise entre 165,20 m et 167,20 m. La formation géologique ferrifère constitue le soubassement de la colline située au sud : l'essentiel du gisement exploité se trouve donc, du point de vue topographique, au-dessus de la vallée. L'eau qu'il contient exerce sa pression sur l'eau s'écoulant à la base de la formation ferrifère qui alimente alors la nappe alluviale par percolation latérale et ascendante.

Ceci explique pourquoi l'ennoyage des galeries et du massif rocheux constituant la colline a provoqué une élévation de la cote piézométrique de la nappe d'accompagnement de la rivière et l'inondation des caves. L'inondation normale de la plaine en période de crue de l'Orne s'en trouve aussi aggravée car l'exhaure minière induisait un rabattement de la nappe.

2.2 Projet de remédiation

Afin de maîtriser de façon pérenne l'impact hydraulique de l'ennoyage des mines sur le bâti de surface, les études ont montré la nécessité de créer un nouveau point de débordement du réservoir minier et d'implanter un système de captage et d'évacuation gravitaire des eaux de

mine vers l'Orne (figure 2). Les conditions hydrauliques d'abaissement du niveau d'eau dans le réservoir minier sont :

- Le seuil de débordement actuel du bassin sud par la galerie de Moyeuve située en rive gauche est à la cote 172,43 m NGF, avec un débit d'exhaure minimum de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ associé à la cote piézométrique 172,72 m dans le réservoir minier, un débit d'exhaure maximum de $4,3 \text{ m}^3/\text{s}$ associé au niveau d'eau 173,51 m dans le réservoir, et un débit dépassant $7,0 \text{ m}^3/\text{s}$ (cote 173,80 m) pour une crue de période de retour 5 ans.
- La cote de la crue centennale de l'Orne mesurée à Moyeuve-Grande est à 174,04 m NGF ;
- Le nouveau seuil de débordement doit ramener le niveau d'eau dans le réservoir minier à une cote inférieure à 170,50 m NGF, cote au-dessus de laquelle les caves les plus basses commencent à être inondées ;
- Compte-tenu de la configuration du site, les eaux de mine captées par les ouvrages à créer devront être acheminées et rejetées en aval dans l'Orne à une cote qui ne peut pas être inférieure à 167,50 m NGF ;
- Les futurs ouvrages devront capter les eaux de mine à partir de travaux miniers abandonnés mais encore accessibles et dont on est sûr qu'ils communiquent avec l'ensemble du réservoir minier ;
- En période de crue de l'Orne, le réservoir minier doit être isolé de la rivière dès qu'elle risque de refouler, par l'ouvrage d'évacuation, dans le réservoir dont le niveau d'eau se retrouve au-dessous de l'Orne.

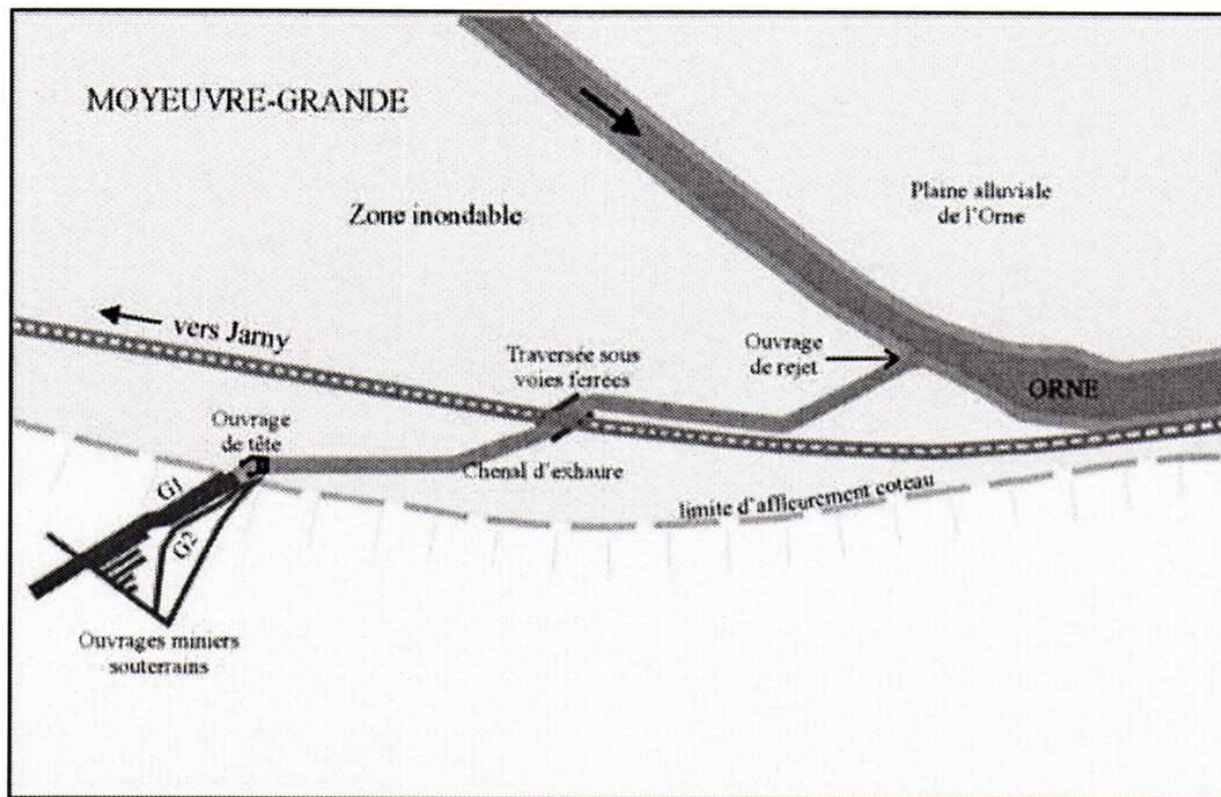


Figure 2 : Ouvrages de surface pour l'évacuation des eaux de mine dans la rivière Orne : Plan. In : Wojtkowiak et al. (2002).

Un code de calcul a permis de simuler les interactions du système complexe réservoir minier – nappe alluviale – rivière et de prévoir avec une précision satisfaisante le débit et le niveau de l'Orne au droit du seuil de débordement à dimensionner ainsi que le débit de débordement et le niveau du réservoir minier, avec ou sans fermeture du futur ouvrage. L'hypothèse de dimensionnement finalement retenue correspond à un ouvrage de capacité supérieure à l'ouvrage actuel, avec un seuil fixé à la cote 169 m NGF, soit 3,43 m plus bas que le seuil actuel, pour un débit maximum de 10 m³/s qui correspond à une lame d'eau de 1,45 m au-dessus du seuil. En cas de fermeture de l'ouvrage, le réservoir minier stocke l'eau et son niveau s'élève : la durée maximale de dépassement de la cote 170,50 m serait alors de 5 semaines d'après les simulations, le temps que l'ouvrage puisse être à nouveau ouvert et que le réservoir minier se vidange dans l'Orne.

En vue d'identifier une galerie adéquate pour servir d'ouvrage d'évacuation, une campagne de reconnaissance du réseau des galeries minières ennoyées a été conduite par un véhicule sous-marin motorisé (Remote Operated Vehicle, ROV) porteur d'une caméra vidéo et de divers instruments de navigation et de mesure.

Un modèle 3D de la structure géologique et du réseau des galeries de mine a été réalisé selon un parallélépipède de 400 m de côté et de 80 m de hauteur au moyen des plans miniers, de la banque de données du sous-sol du BRGM, du levé topographique détaillé du secteur et de deux sondages carottés, avec une incertitude de 0,50 m sur le géoréférencement global. Il a permis d'extraire, selon toutes les directions utiles, des coupes géologiques à l'échelle 1/500 ainsi qu'une visualisation en écorché oblique. Cela s'est avéré un excellent outil de communication et d'explication vis-à-vis des donneurs d'ordre, de l'Administration, des élus locaux et de la population concernée.

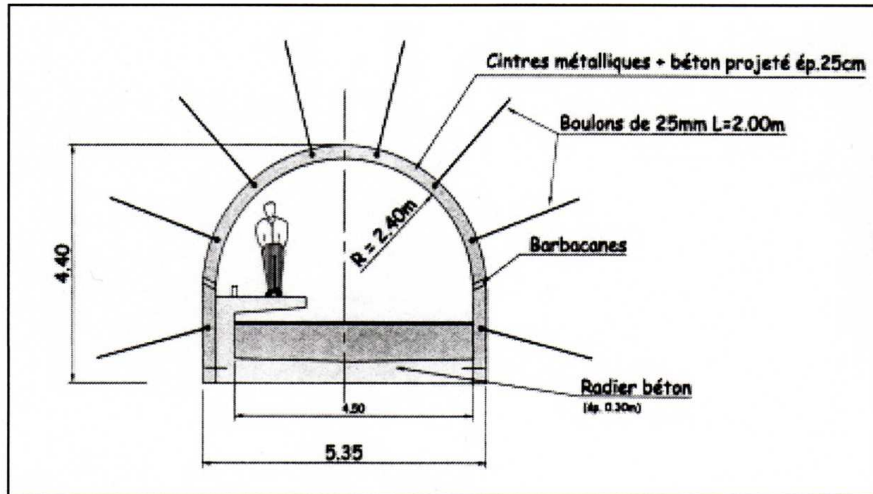
Les futurs ouvrages souterrains comprendront (figure 3) une galerie principale d'exhaure de 230 m de long et un branchement vers une descenderie de mine. Une des principales difficultés qui sera rencontrée lors de la réalisation réside dans le fait que le radier est situé 5 à 6 m sous le niveau d'eau dans le réservoir minier, ce qui impose d'effectuer un rabattement de nappe avant de pouvoir commencer les travaux : il s'agit de rien moins que de pomper à 8 m³/s pendant 1,5 mois en période d'étiage.

Quant au chenal de surface, il aura une longueur totale de 470 m et comportera :

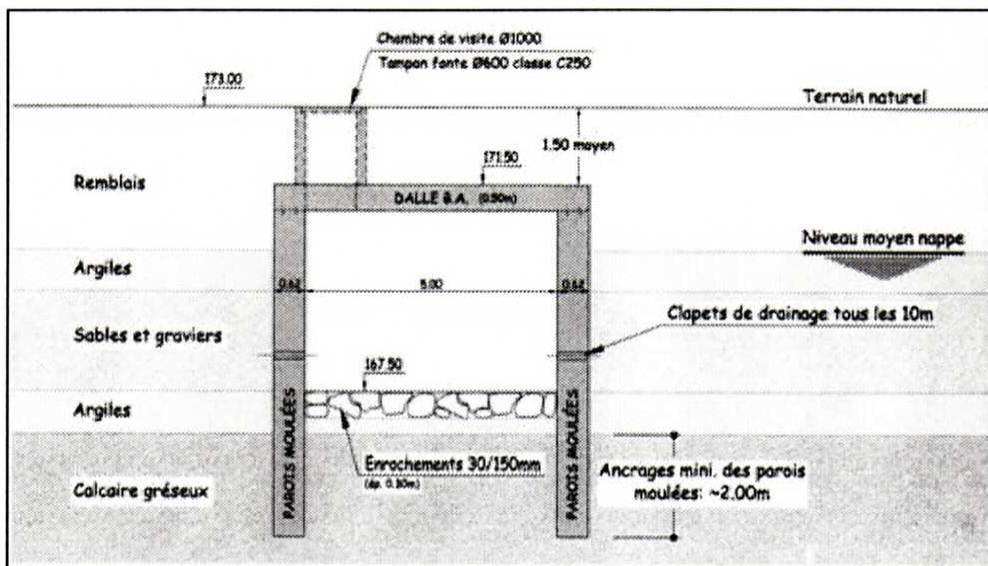
- Le chenal au sens strict, en parois moulées dans la plaine alluviale, puis recouvert pour en réduire l'impact visuel ;
- Un ouvrage amont équipé de deux vannes automatisées associées à un bâtiment de contrôle afin de fermer l'ouvrage en cas de crue de l'Orne ;
- Un franchissement sous voie ferrée de 44 m de longueur creusé au tunnelier à air comprimé (diamètre 3,30 m) avec mise en place de voussoirs en béton préfabriqués clavés au terrain par coulis de mortier, réalisé sans interruption du trafic ferroviaire...

Les travaux préparatoires ont débuté en juin 2001 et la durée des travaux a été de 24 mois. Le coût total de l'ensemble des études et des travaux était évalué à 15 millions d'euros.

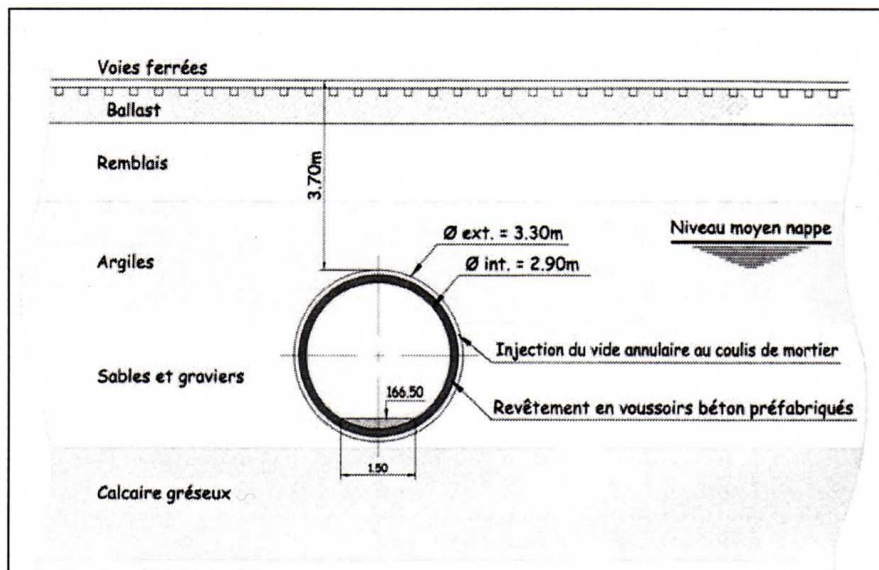
Cet exemple résumé d'après Wojtkowiak et al. (2002) montre l'importance de l'aléa remontée de nappe consécutif à la cessation d'une activité industrielle. Il pourrait servir d'avertissement pour mettre en place à l'avance dans chaque situation particulière un dispositif de remédiation adapté au risque, sans attendre de constater les désordres pour mobiliser des moyens qui sont alors forcément disproportionnés.



A



B



C

Figure 3 : Ouvrages de surface pour l'évacuation des eaux de mine dans la rivière Orne – A. Coupe de la nouvelle galerie d'exhaure ; B. Section-type du chenal d'évacuation des eaux ; C. Coupe de l'ouvrage sous voie ferrée.

3. La remontée de nappe tendancielle en Seine-Saint-Denis

3.1 Evolution passée et future du niveau des nappes phréatiques

L'hydrogéologie de la Seine-Saint-Denis est marquée par la présence d'une nappe perchée sur les plateaux et les buttes-témoins qui circule dans le Travertin de Brie, alimentée uniquement par la pluviométrie, et par un aquifère multicouche régional dans la Plaine de France, le Pays de France et la Vallée de la Marne. Cet aquifère est libre (figure 4) dans les Alluvions et le Marno-Calcaire, captif (figure 4) dans la partie inférieure des Sables de Beauchamp et les Marnes et Caillasses en raison de la présence d'un niveau d'argile sableuse situé dans la partie médiane des Sables de Beauchamp. Un autre aquifère captif circule en profondeur dans les Sables de l'Yprésien, très épais dans le Département en raison de la structure « en cuvette » du bassin (Diffre, 1969 ; Berger et Marquet, 1983).

La forte productivité de ces aquifères a favorisé l'exploitation de pompages par puits forés surtout pour les besoins de l'Industrie. L'arrêt des pompages s'est traduit par une remontée spectaculaire de la nappe dans le secteur de la Plaine-Saint-Denis et ses abords.

Aquifère libre ou captif

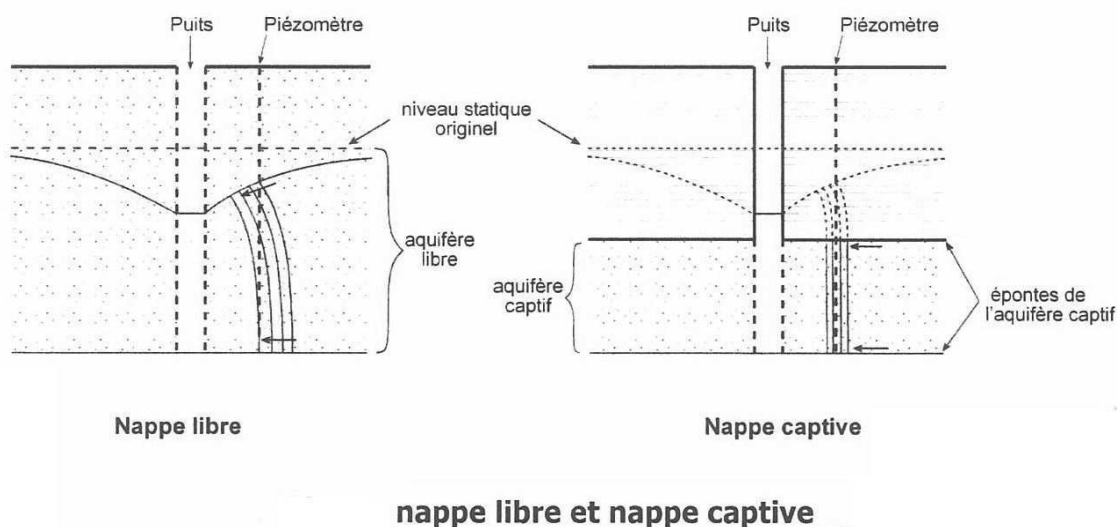


Figure 4 : Les deux types théoriques de nappe.

Une importante superficie du département ne peut être affectée à l'avenir que par des phénomènes naturels (pluviométrie pour les plateaux et crue dans les vallées).

- Les plateaux et les buttes

Il s'agit du massif de l'Aulnaye, des plateaux de Montreuil et de Noisy-le-Grand. A ce jour, nous n'avons pas de données précises sur les variations du niveau statique de la nappe qui circule dans le Travertin-de-Brie, excepté dans le secteur de Montreuil dit des « Murs à Pêches ». Par rapport à la seule cartographie qui a pu être établie, une élévation de l'ordre de 2 m est envisageable à l'avenir.

- La vallée de la Marne

Dans ce secteur, situé au sud du département, ce sont surtout les crues de la rivière qui agissent sur le niveau de la nappe alluviale. L'événement - bref - de l'onde de crue n'a pu être enregistré que sur le site de la Pointe de Gournay (Neuilly-sur-Marne).

- La Plaine de France

C'est le secteur sur lequel les données sont les plus abondantes et pour lequel il existe des données de référence historique : la carte hydrologique de M. Delesse. Cette carte a été établie en 1862 sur le département de la Seine, à la demande du Baron Haussmann, alors Préfet de ce département. Elle a été réalisée à l'aide de relevés effectués dans des puits maraîchers, très nombreux à cette époque.

3.2 Une carte d'isodifférence

Nous avons établi une carte d'iso-différence du niveau statique de la nappe phréatique entre les données de 1862 et les données de 2006 (équidistance des courbes : 2 m). Si l'on considère que le niveau d'eau de Delesse correspond au niveau maximal que la nappe phréatique puisse atteindre, les valeurs indiquées sur la carte seront négatives dans le cas où le niveau actuel est inférieur à celui de 1862 ou positif dans le cas contraire (Fouché et Hirschauer, 2007).

Pour quelques rares secteurs, le niveau actuel est supérieur à celui de 1862 :

- la zone proche de la Seine : ceci s'explique par le fait qu'en 1862, le niveau du fleuve était plus bas qu'actuellement ;
- la commune de Blanc-Mesnil : aucune explication ne peut éclairer ce constat hormis que cette commune est située à la limite de la carte de Delesse.

La zone est de La Courneuve et d'Aubervilliers et la zone située à l'est de ces communes (Le Bourget, Drancy, Bobigny et Pantin) se trouvent à l'intérieur de la courbe -4 m, avec des îlots à -6 m. Ce phénomène de dépression paraît lié à la présence d'importants pompages à Bobigny et surtout à Romainville (puits situés aux limites de Pantin).

Sur les versants de la Butte Pinson (Villetaneuse, Pierrefitte, Stains, Epinay), des courbes à -4 m et -6 m sont à signaler. Hors, il n'y a jamais eu de pompages intensifs sur ces dernières communes. Le gradient hydraulique de la carte Delesse étant très élevé (m/km), nettement supérieur à celui observé dans la Plaine de France, nous pensons que la carte Delesse intéresse en réalité dans ce secteur la nappe qui s'écoule dans les Masses et Marnes de Gypse sur les marnes. A l'occasion de plusieurs études effectuées dans cette zone, nous avons pu constater une nette différence de niveau statique entre la nappe phréatique et celle du Marno-Calcaire de Saint-Ouen cartographiée sur le reste du document. En conséquence nous pensons que ce secteur n'est pas soumis à un risque particulier de remontée de nappe.

Les secteurs dans lesquels les pompages AEP sont les plus développés, situés en dehors du département de la Seine n'avaient pas été cartographiés par Delesse. Cependant, nous y avons effectué de nombreuses études dès l'origine du LREP et sans effectuer une étude exhaustive des données, nous pouvons indiquer que le niveau de la nappe phréatique a peu évolué depuis une trentaine d'années si l'on excepte les fluctuations naturelles liées aux pluviométries extrêmes. Il est possible d'expliquer ce phénomène par le fait qu'une grande rigueur est employée dans l'équipement des puits. Il est en effet essentiel, pour les exploitants, de bien séparer les eaux qui circulent dans les Sables de l'Yprésien des eaux souterraines de qualité moyenne voire médiocre de la nappe phréatique. Les pompages d'AEP, pérennes, sauf

accidents pouvant affecter la nappe de l'Yprésien, semblent donc n'avoir aucune incidence sur la nappe phréatique.

3.3 Conclusions

A l'aide de documents graphiques existant au LREP, l'exploitation de données d'archives et des relevés ponctuels (DEA, LREP, ADP, SNCF, RATP et communes), la carte isopiézométrique des nappes phréatiques a pu être dressée sur une bonne partie du département. Il s'agit d'un « niveau d'eau moyen » correspondant à des périodes pluviométriques normales et non affectées par une crue des cours d'eau. Les nappes phréatiques des plaines et des vallées sont assez bien cartographiées mais il subsiste des zones mal renseignées.

Après analyse des différentes données, nous pensons que l'Est de La Courneuve et d'Aubervilliers, les communes du Bourget, de Bobigny, de Drancy, de Pantin et du Bas Pays de Romainville pourraient être affectées par une remontée de la nappe de l'ordre de 4 mètres en cas d'abandon total des pompes industrielles. L'inondation des parkings déjà observée (figure 5) serait alors suivie d'impacts beaucoup plus graves sur les structures urbaines.

Par contre, les secteurs de Tremblay-en-France, d'Aulnay-sous-Bois et de Blanc-Mesnil, bien que fortement exploités par des pompes d'alimentation en eau potable, ne semblent pas être affectés par ces captages.



*Figure 5 : Inondation d'un parking souterrain par remontée de nappe ;
inondation en surface par remontée de nappe.*

4. Impact de la nappe sur les structures de génie civil en milieu urbain : les tranchées couvertes

Pour présenter l'impact de la nappe sur les structures de génie civil, on traite ici l'exemple des tranchées couvertes. Dans les années 70, l'engorgement de la voirie en surface a conduit les grandes villes à opter pour une solution de transport par voie souterraine en *tranchée couverte*, tant pour l'automobile que pour le métro, puis le tramway. Ce procédé consiste à construire entre deux rideaux de soutènement, soit autostables, soit butonnés ou tirantés, un cadre en béton armé qui peut intégrer ou pas le soutènement constitué de palplanches, de pieux jointifs, ou de parois moulées ou préfabriquées, et plus récemment en site exigu, de *jet grouting*. Toutes ces techniques de soutènement produisent, sur toute la hauteur, une barrière étanche

qui dévie l'écoulement de la nappe. L'incidence sur l'écoulement dépend de la hauteur d'interception de la nappe, de la longueur de l'ouvrage et de son orientation par rapport au sens d'écoulement. On peut réduire cette incidence par des dispositions constructives. En retour, la nappe impacte l'ouvrage, en phase de construction en déstabilisant le fond de fouille, ce qui nécessite un rabattement de nappe par pompage (figures 6 et 7), et en phase d'exploitation par divers effets causés par la pression hydrostatique sur les structures.

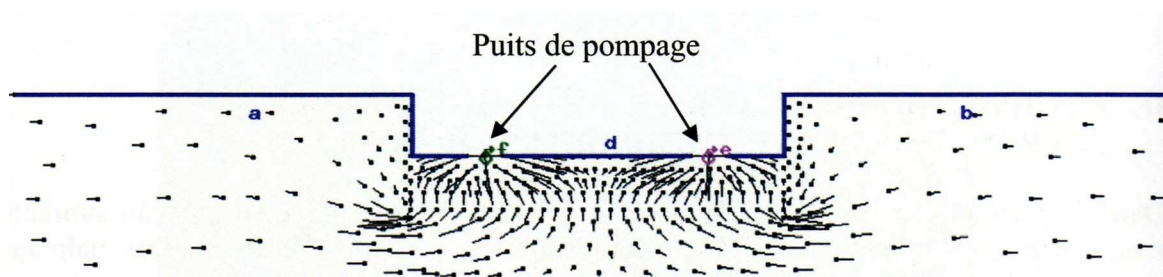


Figure 6 : Visualisation des vecteurs de la vitesse d'écoulement sous l'influence d'un pompage de rabattement de nappe dans un code de calcul en éléments finis.

4.1 Exemples de désordres affectant les tranchées couvertes

La plupart des désordres de tranchées couvertes sont liés à une mauvaise exécution de l'ouvrage et apparaissent le plus souvent en phase de travaux. Mais certains apparaissent plus longtemps après la mise en service : ils sont dus à une erreur de dimensionnement, ou au vieillissement des matériaux, ou encore à une évolution du terrain ou des conditions d'exploitation de l'ouvrage. Enfin, certains sont liés à la conception elle-même.

Désordres structuraux, désordres liés à l'étanchéité et au drainage

- Déviation entre panneaux causée par une mauvaise implantation ou un mauvais guidage ;
- Armatures apparentes dans le cas où l'enrobage est insuffisant ou par altération du béton ;
- Fissures et fractures dues au sous-dimensionnement, au retrait du béton ou aux efforts plus importants que prévu ;
- Ségrégation du béton ; inclusion de matériaux pollués.
- Absence, dysfonctionnement ou altération du système de drainage interne (colmatage des drains, dégradation...) causée par une mauvaise conception, un défaut d'entretien, ou la nature chimique des eaux drainées ;
- Percolation d'eau au niveau des joints entre les panneaux (défauts d'étanchéité) ou des fissures ;
- Stagnation des eaux causée par l'absence ou un défaut du dispositif de collecte des eaux.

Exemples

Pendant les années 1990, des arrivées d'eau se produisirent dans une trémie routière à Lille. La structure de l'ouvrage consistait en un cuvelage construit entre palplanches utilisées pour le soutènement provisoire. La nappe étant haute, la stabilité du radier avait été assurée par des micropieux mais ceux-ci furent réalisés après le radier par forages à travers des espaces réservés dans le radier (figure 8), puis replissage au-dessus des micropieux par un mortier. La structure de chaussée au-dessus du radier était plutôt mince (10 à 15 cm). Les investigations menées ont conclu que l'entrée d'eau se faisait par les réservations des micropieux. Il

s'agissait donc d'une erreur de *conception de l'ouvrage* dans sa relation à la nappe dont les effets avaient toute chance de se multiplier à l'avenir. Des travaux de modification ont donc été réalisés.

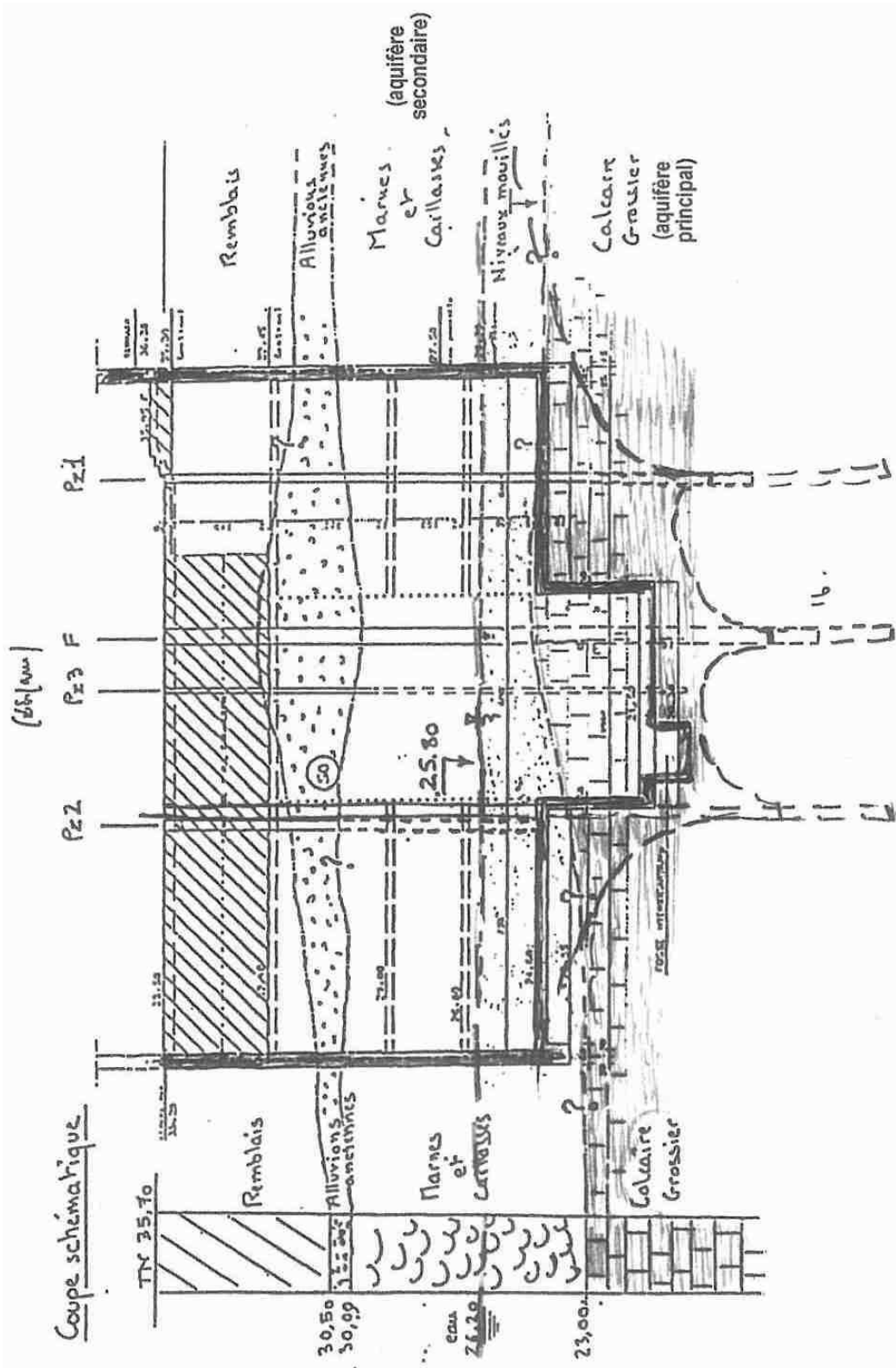


Figure 7 : Coupe schématique d'une fouille avec rabattement de nappe dans les formations géologiques de Paris. (Schéma prêté par le Burgéap).

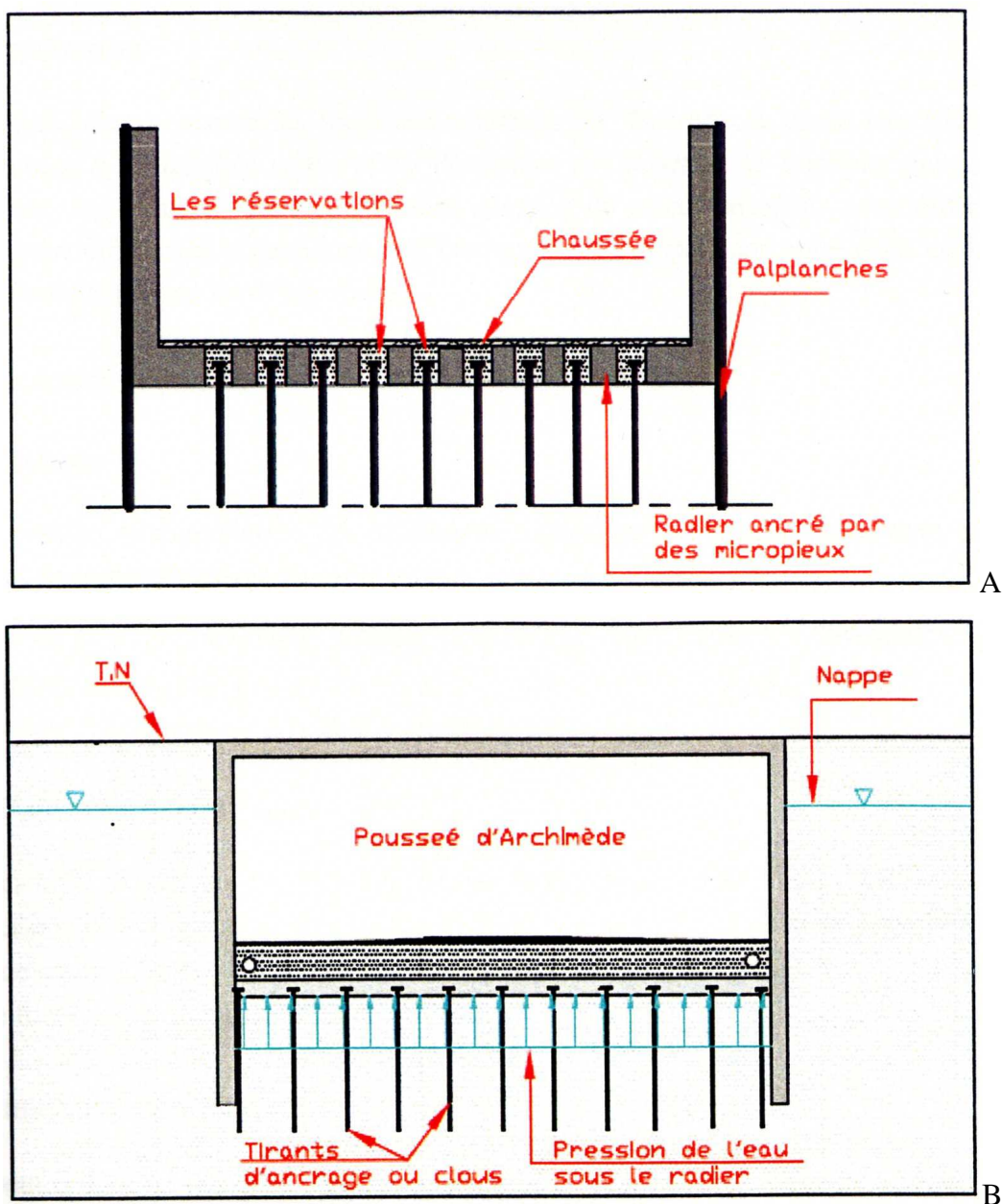


Figure 8 : A. Coupe schématique de l'ouvrage en trémie de Lille ; B. Schéma général du radier ancré par des tirants d'ancrage ou clous.

En 2005 ont été constatées pendant plusieurs mois des venues d'eau sur la chaussée de l'échangeur A86 / A14 au PM 2050, à une distance de 2 m du piedroit central. Le débit observé était faible (environ $1 \text{ m}^3/\text{h}$) et l'eau s'écoulait sur la chaussée pour rejoindre le réseau d'assainissement situé le long du piedroit nord. Mais l'enrobé de la chaussée commençait à s'arracher (sur une longueur de 0,20 m au moment du diagnostic) et une fissure peu apparente prolongeait le décollement sur une longueur inférieure à 1 m. Le détail de la coupe du PM 2050 (figure 9) indiquait la présence d'un écran d'étanchéité transversal de 0,50 m d'épaisseur en ciment bentonite, défini comme écran souple. Par-dessus, une poutre en béton puis le radier, avec interposition d'un joint Water-Stop. Le défaut d'étanchéité provenait de ce joint ou de la liaison écran souple / radier. Les investigations comportant des forages verticaux dans la chaussée confirmèrent les arrivées d'eau sous pression. Puis une campagne au géoradar montra qu'il n'existait pas de vide sous la chaussée. Enfin, l'ouverture d'une fouille à la

jonction semelle / radier confirma l'entrée de l'eau au niveau d'une plaque de polystyrène interposée entre le radier et la semelle : c'est donc une *dégradation précoce et imprévisible du dispositif d'étanchéité* qui était responsable, dont il est difficile de dire si elle est due à un *défaut ponctuel d'exécution* ou à une *négligence dans la conception*.

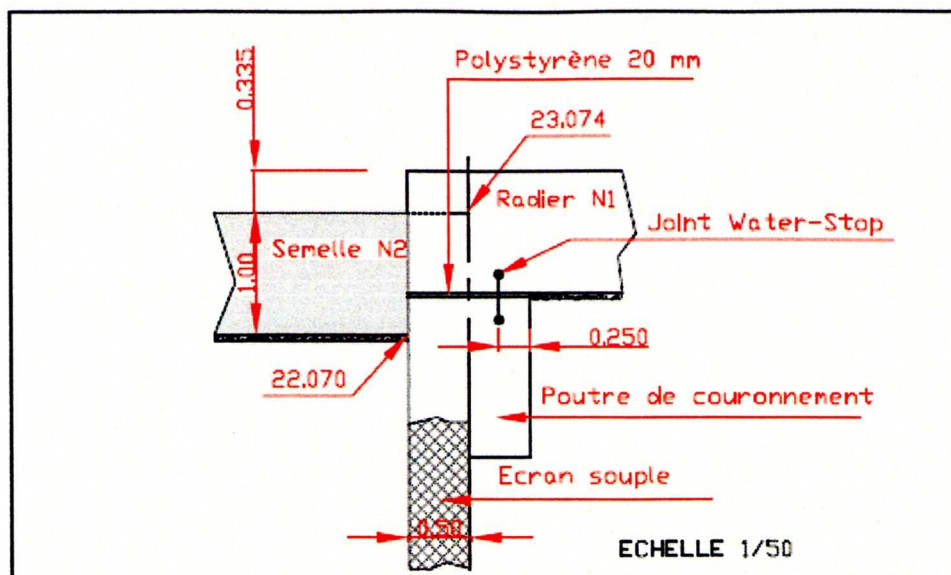


Figure 9 : Détail du PM 2050 de l'échangeur A86 / A14 à Nanterre (92).

Parmi les pathologies, il citera enfin un problème qui peut rester très discret pendant une période longue d'exploitation, le colmatage des drains d'une chaussée drainante comme par exemple l'A86 à Bobigny (figure 10). Quelques mois après leur mise en fonctionnement, certains drains proches de la station de relèvement « Préfecture » ont vu le dépôt d'épaisseurs centimétriques de calcite sur les parois des regards et les échelons d'accès (figure 11). L'origine du colmatage est à rechercher dans la nature chimique de l'eau : dans l'exemple, on a trouvé une eau sulfatée et bicarbonatée calcique de dureté totale très élevée $TH = 114^{\circ}F$ (titre hydrotimétrique en degré Français) alors que les eaux de la nappe du calcaire de Saint-Ouen ont une dureté moyenne $TH = 60^{\circ}F$. Dans ce cas, cette dureté anormalement élevée était due aux sulfates. Le point représentatif de cette eau dans un diagramme $CO_2 \text{ total} = f(Ca^{2+})$ se situe au-dessous des courbes d'équilibre y compris pour une température de $11^{\circ}C$ (température ambiante de l'eau de la nappe). C'est pourquoi cette eau est nettement calcifiante et pourrait à long terme (rien n'a été fait pour y remédier depuis le constat il y a dix ans) provoquer l'obturation par entartrage du dispositif de drainage. Par ailleurs, ce phénomène s'accroît en période d'augmentation de la température et quand la pression exercée sur le fluide diminue.

Il s'agit donc ici d'une *altération lente et prévisible du système de drainage* interne de l'ouvrage, dont les effets n'ont pas encore été considérés comme assez graves pour mériter une intervention qui sera lourde car elle touchera à la structure même de la chaussée.

Conclusion

Il ne suffit pas que l'ouvrage soit bien construit, il faut que chaque élément constituant l'ouvrage soit entretenu. Cet entretien de l'ouvrage ne passe pas seulement par l'entretien courant (désherbage, curage des caniveaux...) mais aussi par une inspection périodique de l'ouvrage (partie génie civil et équipement). Ces inspections peuvent prévenir l'apparition de certaines pathologies qui diminuent la durée de vie de l'ouvrage. Malgré l'essor important

connu par les tranchées couvertes dans les 30 dernières années en zone urbaine, elles restent marginales (exemple : la tranchée sous-fluviale de Nogent-sur-Marne inspectée en 2005) par rapport aux tunnels. Actuellement, il n'existe pas de recommandations pour l'inspection de ces ouvrages et la plupart des procédés d'étanchéité ne sont développés et normalisés que pour les tunnels. Une opération IQOA lancée par la Direction Générale des Routes depuis les années 1990 a pour but de produire des recommandations pour l'inspection, la surveillance et la réparation des ponts, des murs, des tunnels, et des tranchées couvertes routières.

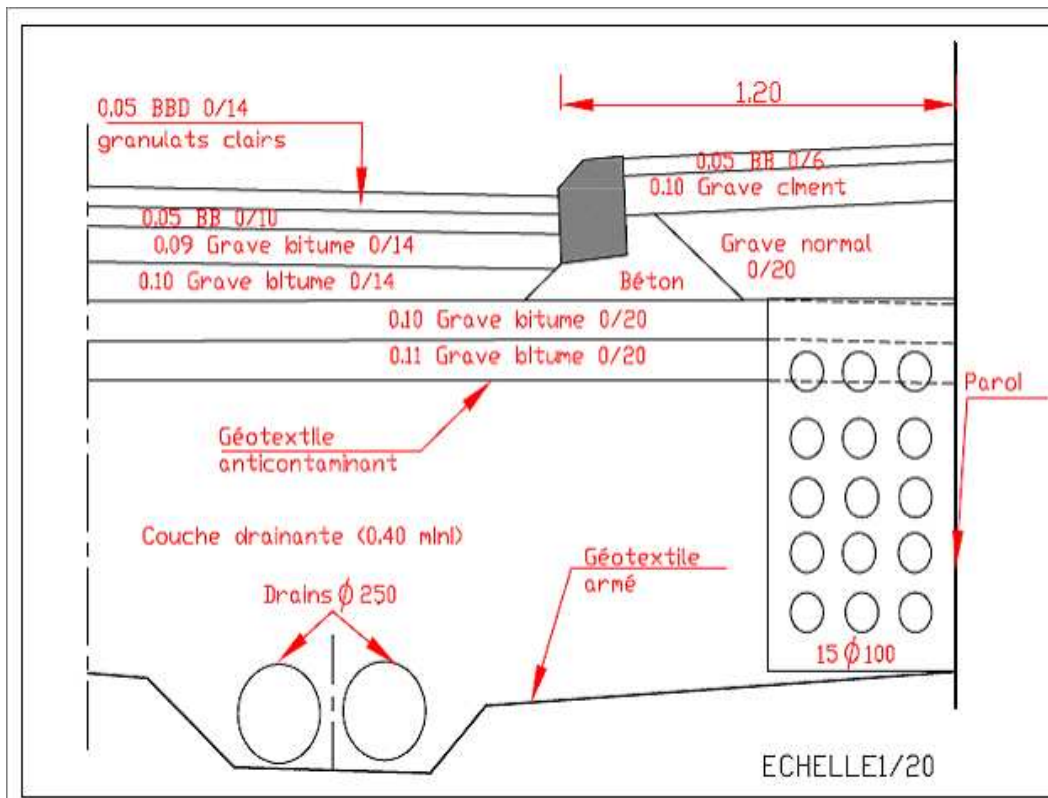


Figure 10 : Coupe schématique pour la réalisation d'une chaussée drainante.



Figure 11 : Photographie de drains en voie de colmatage sous la chaussée drainante de l'A86 ; dépôt de calcite sur l'échelle d'accès.

4.2 Exemple de projet de tranchée couverte avec chaussée drainante sous nappe

On présente ici le cas des tranchées couvertes de Bobigny, avec trois ouvrages au niveau de la Préfecture, du carrefour des Six Routes et du site Repiquet, qui ont été réalisées en chaussée drainante. L'objectif de l'étude était d'estimer le débit par différentes méthodes pour des conceptions différentes de l'ouvrage.

Dispositions constructives pour protéger l'ouvrage de l'impact de la nappe

En phase de construction (figure 12), la stabilité du fond de fouille vis-à-vis de *l'effet renard* sous forte pression hydrostatique est assurée à la fois par le dimensionnement de la fiche du soutènement et par un bouchon étanche sous le fond de fouille pour limiter le débit à drainer à une valeur très faible. Deux techniques sont utilisées selon la profondeur d'intervention :

- On terrasse sous l'eau, entre les rideaux de soutènement, jusqu'à une profondeur en-dessous du fond de fouille projeté, puis on comble cet espace en coulant sous l'eau un béton qui constituera après prise un bouchon étanche assurant par son poids la stabilité à la sous-pression : 1 m d'épaisseur de béton équilibre la pression de 2 m d'eau et la technique n'est pas utilisée au-delà de 2 m d'épaisseur ;
- Pour une épaisseur supérieure, la relève est prise par le radier injecté (figure 13) qui évite d'approfondir le fond de fouille et qui peut atteindre jusqu'à 5 m d'épaisseur : cela implique déjà une profondeur importante de la fiche de soutènement pour encager le béton injecté et un volume d'injection très important, d'où la limite en épaisseur.



Figure 12 : Tranchée couverte en phase de construction, A86, la Défense.

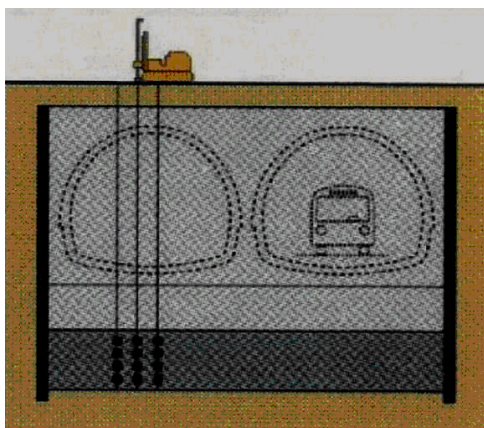


Figure 13 : Schéma de principe du radier injecté (Solétanche-Bachy).

Lorsque la profondeur du fond de fouille est encore plus grande, ainsi que son dénivelé avec le niveau piézométrique de la nappe, on doit avoir recours à l'ancrage du soutènement dans un substratum très peu perméable comme à Lyon par exemple, le granite ou la molasse. Toutes ces dispositions constituent un barrage complet à l'écoulement de la nappe.

Contexte hydrogéologique

La succession stratigraphique est représentée sur une coupe géologique (figure 14) faite d'après les reconnaissances de terrain, qui donne l'épaisseur de chaque formation géologique, son faciès, ainsi que le niveau piézométrique de la nappe. Sur le tracé, deux aquifères principaux sont présents :

- Le Marno-calcaire de Saint-Ouen constitue le premier aquifère continu et assez puissant et correspond à la nappe phréatique dite générale dans la Plaine de France, et est le seul à intéresser ici les tranchées couvertes ;
- Les Marnes et Caillasses forment un aquifère qui est en charge (captif) et dont le mur est constitué : soit par les premiers mètres de cette formation qui sont à faciès marneux, soit par l'écran argileux médian de la formation des Sables de Beauchamp.

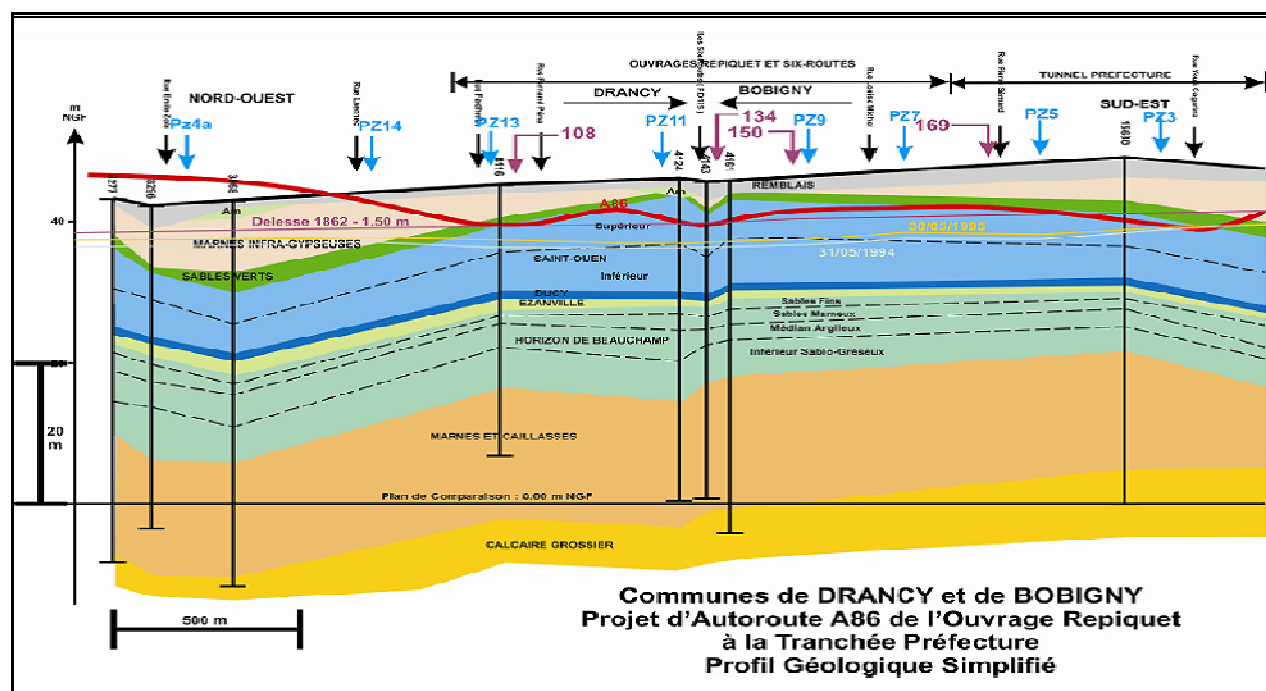


Figure 14 : Coupe géologique du tracé de la tranchée couverte de l'A86 (dép. 93).

Le tracé routier présente une orientation sensiblement parallèle au sens général d'écoulement de la nappe, SW-NE. Les essais de perméabilité de type Lefranc ont fourni les valeurs suivantes : pour la tranche supérieure du Marno-calcaire de Saint-Ouen, à faciès dominant marneux, $K = 10^{-7}$ à 10^{-5} m/s, et pour la tranche inférieure, plus calcaire, $K = 10^{-5}$ à 10^{-4} m/s. Sur ce tracé, une évolution en remontée de la nappe a été observée, due en grande partie à l'arrêt progressif des pompages industriels depuis une trentaine d'années. C'est pourquoi on a considéré comme niveau maximal actuel de la nappe dans les calculs un niveau proche du niveau maximal historique pré-industriel, celui de la carte hydrogéologique établie en 1862 par Delesse. On a supposé que ce niveau maximal n'est pas encore atteint et qu'on est environ 1,5 m en-dessous. Par ailleurs, des fluctuations importantes ont été enregistrées, notamment entre avril 1994, début des travaux, et avril 1995 où la nappe est remontée par endroits de 2 m

sans que l'on sache exactement pourquoi et quelle part y ont pris les travaux en cours. Depuis cette date et jusqu'à 2001, pic climatique, la nappe a poursuivi sa remontée progressive et a gagné encore 2 m.

Contexte géotechnique

La synthèse géotechnique des reconnaissances a conduit à un découpage du tracé de l'autoroute A86 en 4 zones se distinguant par l'avancée de la dissolution des niveaux gypseux présents à l'origine dans les formations géologiques des Marnes et Caillasses, du calcaire de Ducy, du Marno-calcaire de Saint-Ouen et de la quatrième masse du gypse Ludien et des marnes infragypseuses.

- Zone I. Cette zone est caractérisée par l'absence de gypse dans le Marno-calcaire de Saint-Ouen et le Ducy ; cette disparition totale du gypse a généré un léger affaissement des couches géologiques compensé au niveau du terrain naturel par des dépôts alluviaux ;
- Zone II. Dans le Marno-calcaire de Saint-Ouen et le Ducy, un lessivage des bancs gypseux a engendré une disparition presque totale du gypse ; mais des anomalies ponctuelles (zones décomprimées ou cavités remblayées) ont été mises en évidence dans les Marnes et Caillasses ;
- Zone III. Cette zone correspond à un risque plus élevé associé à la dissolution du gypse ; elle se distingue en effet de la zone II par la persistance de niveaux gypseux dans le Marno-calcaire de Saint-Ouen et le Ducy ; de plus, elle est influencée par la rupture d'anciennes cavités dans la partie supérieure des Marnes et Caillasses (et aussi dans les Sables de Beauchamp) et par une réduction d'épaisseur de cette formation par disparition du gypse ;
- Zone IV. Cette zone est caractérisée par l'absence totale de gypse dans le Marno-calcaire de Saint-Ouen et le Ducy, mais des Marnes et Caillasses présentant dans leur partie supérieure des cavités franches ou des zones décomprimées (mais pas dans les Sables de Beauchamp).

4.3 Estimation des débits

En l'absence de voile injecté, l'eau transite essentiellement dans le Saint-Ouen inférieur et dans le Ducy, auxquels on affecte une perméabilité $K_h = K_v = 10^{-3}$ m/s. Le milieu est considéré comme homogène et isotrope et le débit entrant dans la fouille peut alors se calculer par la méthode analytique de Chapman pour un écoulement horizontal. Cette formule donne un débit par unité de longueur de la tranchée et s'applique au cas général d'une tranchée n'atteignant pas la base de la nappe. On obtient un débit total d'exhaure $Q_1 = 2030$ m³/h pour un tronçon long de 2178 m.

En présence d'un voile injecté, on applique la loi de Darcy pour un écoulement horizontal. Les parois constituant le voile injecté n'ont pas une perméabilité nulle ($K = 5.10^{-6}$ m/s) et ne sont pas continues (jambes de pantalon) : la surface s'opposant à l'écoulement de la nappe représente 75 % de la superficie totale. On obtient un débit total d'exhaure $Q_2 = 153$ m³/h pour le même tronçon long de 2178 m. La comparaison avec le résultat précédent donne un aperçu de l'effet barrage que ces parois prolongées par des écrans injectés opposent à la nappe.

Une modélisation numérique au moyen de VModFlow a été réalisée dans un domaine maillé de 3 km de côté avec une maille de 20 m x 20 m autour du centre et de 60 m x 60 m pour le

reste de la surface, avec 8 couches de terrain superposées, caractérisées par leurs valeurs de perméabilité verticale et horizontale.

Les conditions aux limites de potentiel dépendent du niveau de la nappe et on a envisagé trois variantes (tableau 1) :

Tableau 1: Cote atteinte par la Seine lors de trois crues historiques.

Cote en m NGF	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Amont	43	41	39
Aval	38	36	35

La tranchée est modélisée par des parois en béton d'épaisseur 0,80 m et de perméabilité 10^{-8} m/s pour les parois moulées, les parois préfabriquées et les parois au coulis. Quant aux parois injectées de largeur 4 m, on leur donne une perméabilité de 5.10^{-6} m/s. La cote d'arrêt des parois est adaptée selon deux cas :

- Cas 1 : parois moulées ou préfabriquées dans le Saint-Ouen supérieur (figure 15).
- Cas 2 : parois moulées ou préfabriquées dans le Saint-Ouen supérieur prolongées dans les sables fins (figure 16) par des parois au coulis (tranchée de la Préfecture) ou des jambes de pantalon et des écrans injectés (ouvrage de Repiquet).

Tableau 2: Cote atteinte par la Seine lors de trois crues historiques.

Débit calculé en m ³ /h	Cas 1	Cas 2
Variante 1	1024	293
Variante 2	459	68
Variante 3	91	4

Le tableau 2 confirme l'idée que l'on pouvait se faire sur l'influence des divers facteurs : le débit diminue selon la variante du modèle en raison des différentes épaisseurs de nappes prises en compte. De plus, le débit drainé diminue quand la profondeur des parois augmente.

Le décalage des isopièzes par rapport à l'état initial (figure 17) dans le cas des parois courtes s'explique par l'effet du drainage des eaux dans la tranchée.

Dans le cas des parois longues, on observe deux types de décalage (figure 17) :

- Décalage à l'état final entre les isopièzes à l'amont et à l'aval de la tranchée, qui met en évidence l'effet barrage créé par la « boîte » (figures 18 et 19).
- Décalage entre l'état initial et l'état final : abaissement du niveau en un point donné qui peut s'expliquer par le drainage dû à la tranchée.

On remarque que dans les parois longues, l'effet de drainage (abaissement de la nappe) est moins important que pour les parois courtes (0,50 m au lieu de 1 m environ), ce qui est cohérent avec les débits calculés. Cette interprétation est valable pour les variantes 2 et 3.

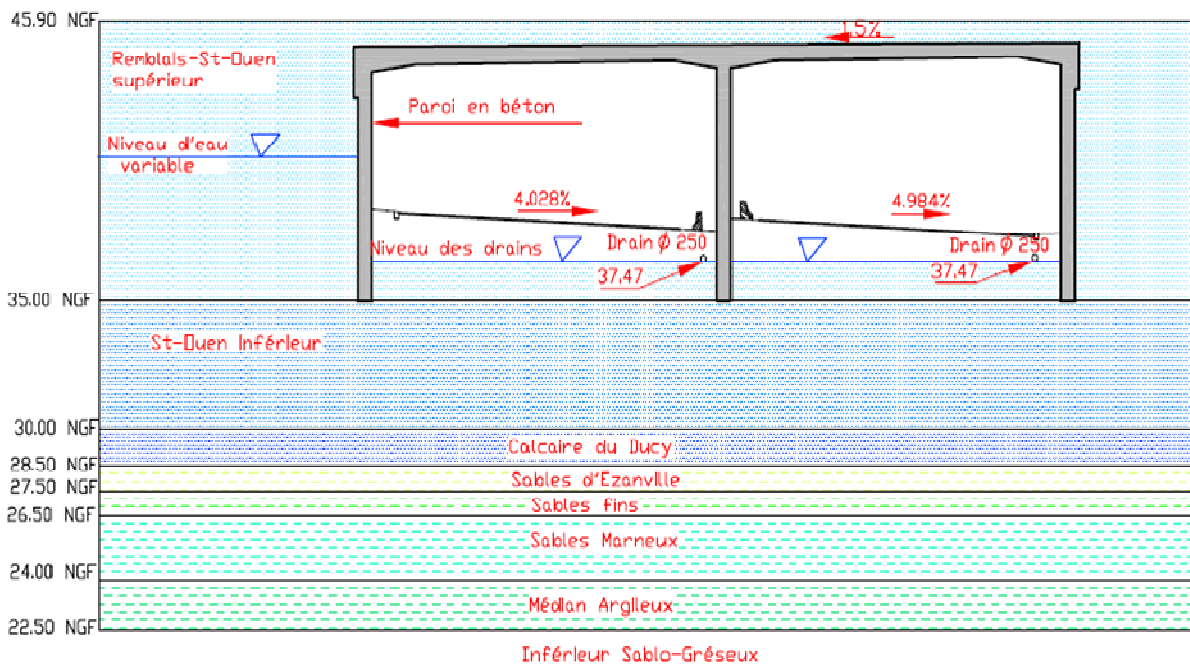


Figure 15 : Coupe de la tranchée couverte de Bobigny, tronçon à chaussée drainante. Cas 1 : parois moulées ou préfabriquées jusqu'à la limite du Calcaire de Saint-Ouen inférieur et supérieur.

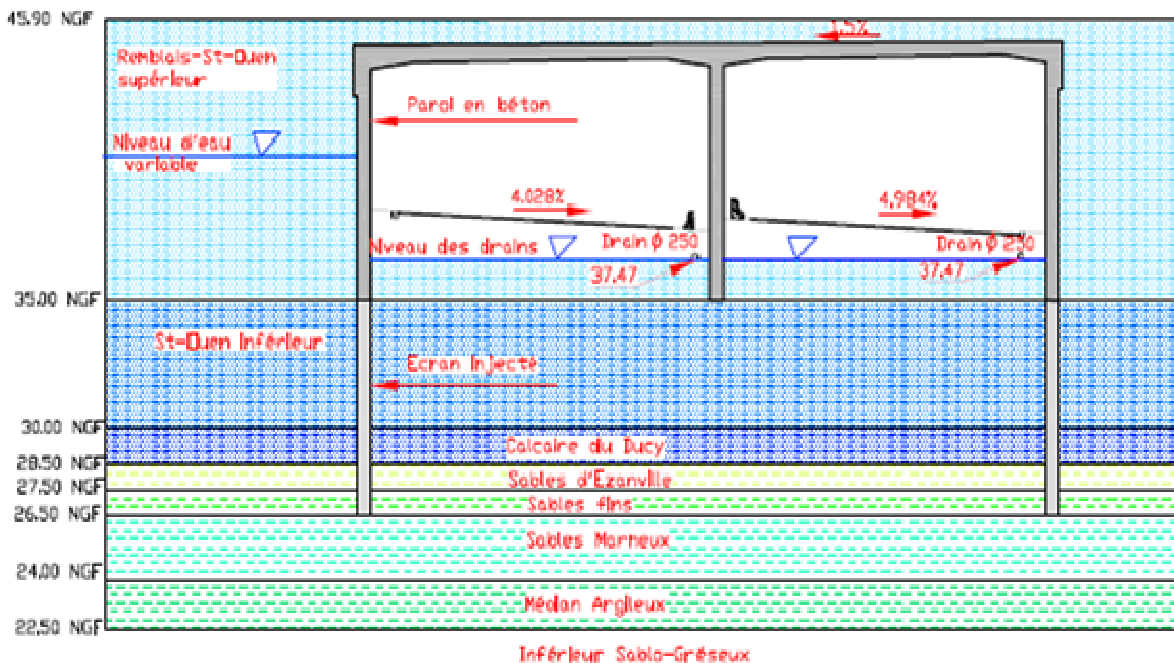


Figure 16 : Coupe de la tranchée couverte de Bobigny, tronçon à chaussée drainante. Cas 2 : parois dans le Calcaire de Saint-Ouen supérieures, prolongées jusqu'à la base des Sables fins par des parois au coulis (tranchée de Préfecture) ou des jambes de pantalon et écrans injectés (ouvrage de Repiquet).

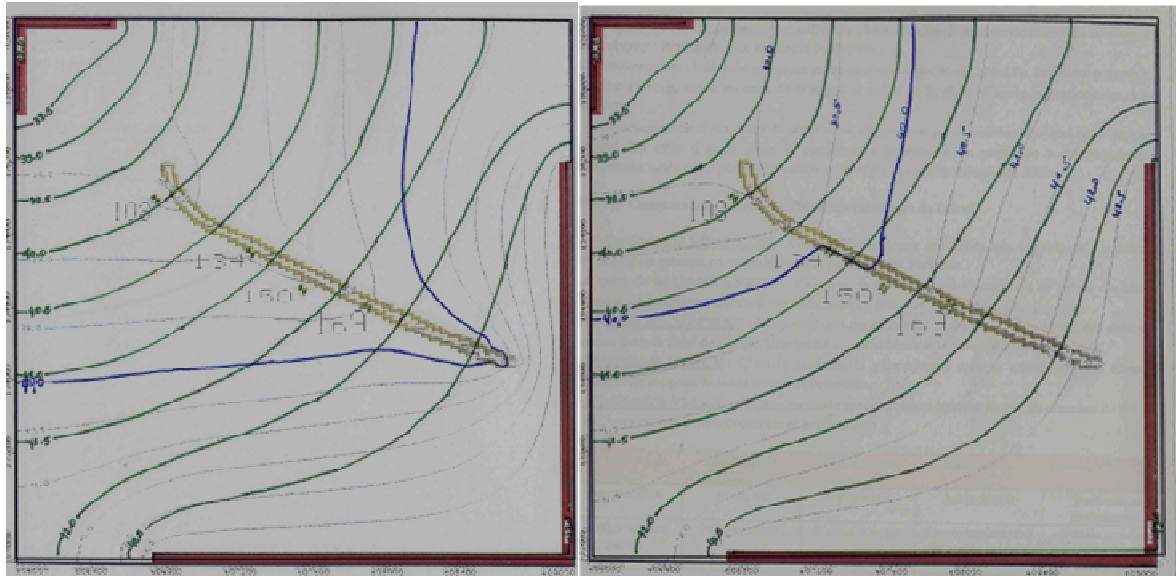


Figure 17 : La comparaison des courbes piézométriques simulées (courbes en gris, dépendant du cas) avec celles de l'état initial (courbes en vert) indique un abaissement du niveau en chaque point d'environ 1 m dans le cas 1 (resp. 0.50 m dans le cas 2) qui peut s'expliquer par le drainage sous chaussée. De plus, il apparaît un décalage des courbes piézométriques du cas 2 entre l'amont et l'aval de la tranchée qui peut s'expliquer par un effet barrage.

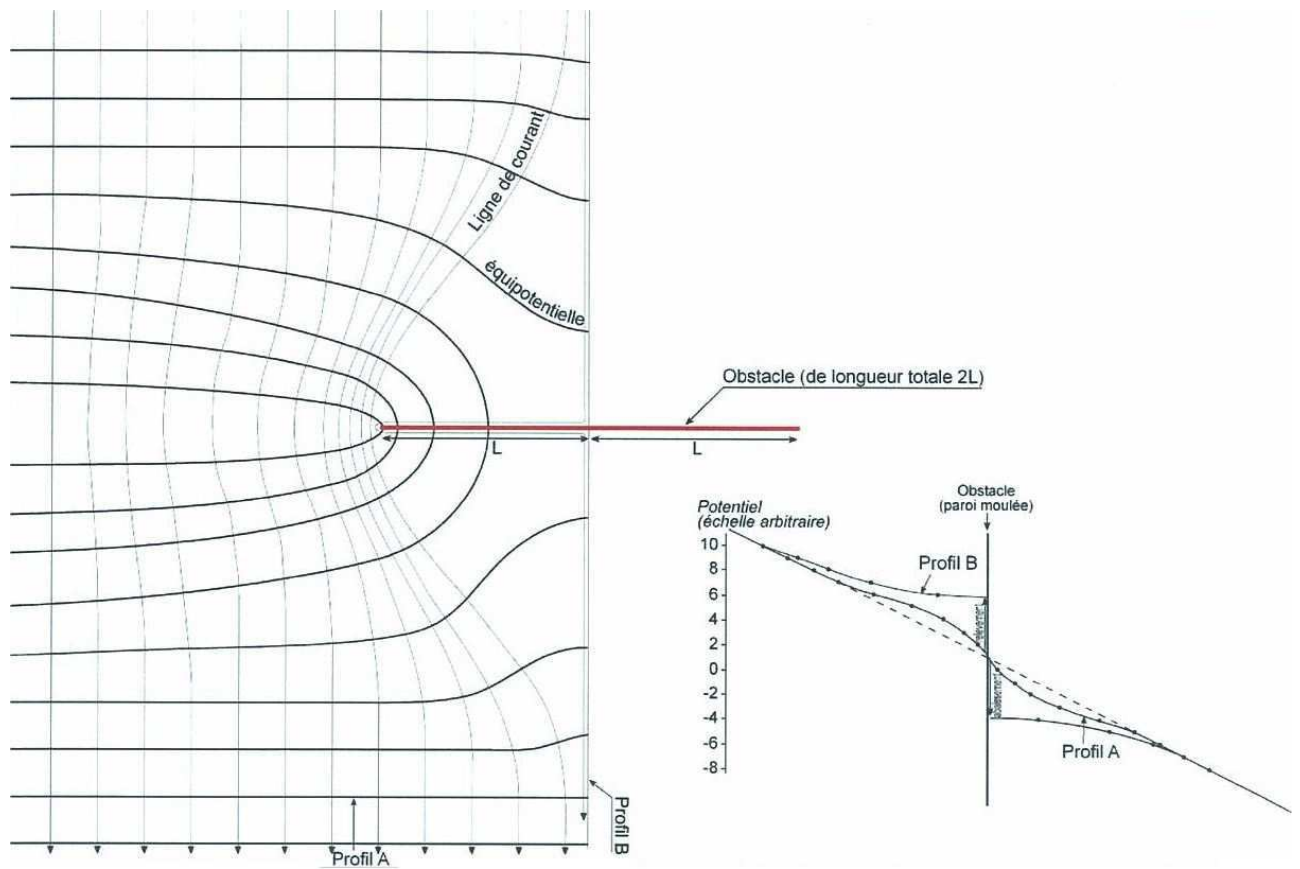


SCHÉMA DE PRINCIPE DU RÉSEAU D'ÉCOULEMENT THÉORIQUE AVEC UN OBSTACLE INTERCEPTANT TOTALEMENT LA NAPPE (DE TYPE PAROI MOULÉE)

Figure 18 : Effet d'une paroi moulée sur l'écoulement de la nappe, plan / coupe.

Un obstacle est resté devant l'interprétation de cette modélisation : il existe trois stations de pompage, une à Repiquet, une à Six-Routes, et la dernière à Préfecture. Ces stations sont dotées de plusieurs pompes d'une capacité de 320 l/s. Les eaux pompées sont un mélange entre des eaux de nappes et des eaux de pluie. Mais nous n'avons pas pu obtenir le débit réel pompé dans la nappe. En effet, d'après le gestionnaire du système de pompage, celui-ci a été largement surdimensionné et il n'a pas été jugé nécessaire de mesurer le débit.

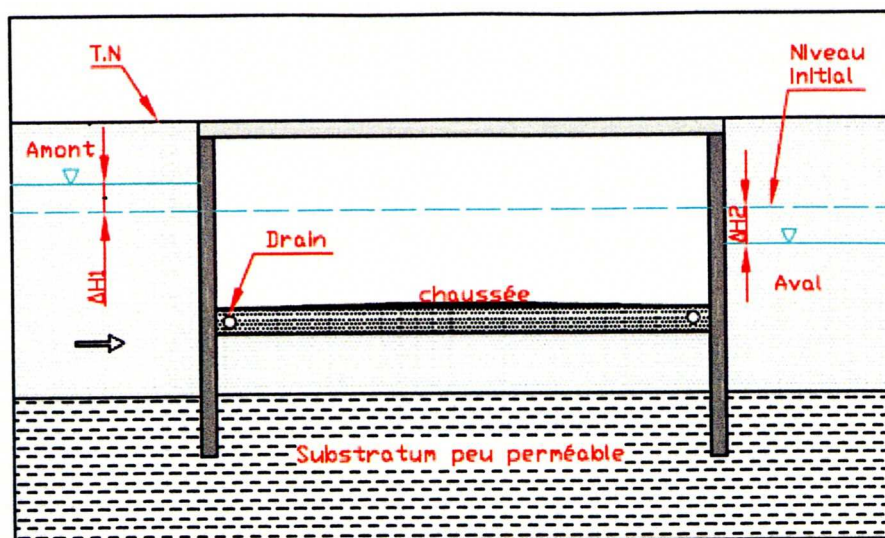


Figure 19 : Effet barrage créé par la paroi amont d'une tranchée couverte.

5. Prévoir l'impact de la crue de nappe sur un bâtiment

Dans cette partie, on présente un exemple deux projets de fondations sous nappe prenant en compte le risque associé à une crue de nappe afin de réduire l'impact éventuel pendant la construction ou sur les *futurs bâtiments*.

5.1 Contexte hydrogéologique d'un projet de fondations de bâtiment sous nappe

Considérons un projet type en zone résidentielle : un bâtiment R+7 dont l'emprise au sol couvre les 625 m² de la parcelle, avec deux niveaux de sous-sols. Le niveau du sous-sol inférieur se situe à environ 5 m de profondeur par rapport au terrain dit naturel (TN) qui présente une surface plane et horizontale. La parcelle est actuellement occupée par une cour intérieure entourée de bâtiments d'activités, d'habitations ou de garages en rez-de-chaussée ou R+1 sans sous-sol.

Le site se trouve sur la commune de Boulogne-Billancourt, dans la plaine alluviale de la Seine. Selon les études disponibles à proximité du site et d'après la carte géologique au 1/50 000 (figure 20), les terrains intéressés par le projet sont représentés par les formations géologiques suivantes :

- Remblais : terre végétale, sables, matériaux de démolition et autres matériaux liés aux aménagements antérieurs ;
- Alluvions modernes : dépôts limoneux, argileux et sableux, avec des niveaux tourbeux ;
 $K_h = 10^{-5}$ m/s et $K_v = 5.10^{-7}$ m/s ;

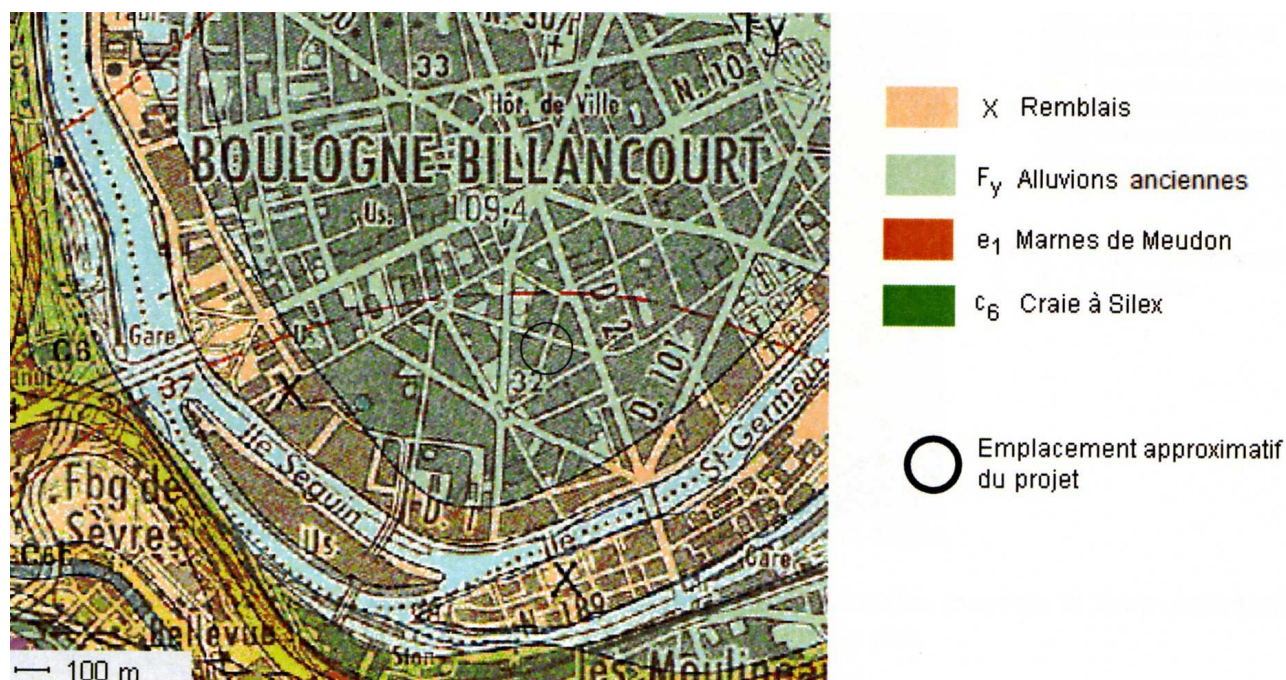


Figure 20 : Extrait de la carte géologique, feuille de Paris, N°183 : secteur appartenant à la commune de Boulogne-Billancourt.

- Alluvions anciennes : sables plus ou moins grossiers et graves, avec rognons de silex, galets de calcaire et craie, qui occupent la basse terrasse ; $K_h = 3 \cdot 10^{-3}$ m/s, $K_v = 10^{-4}$ m/s ;
- Marnes de Meudon : marnes calcaireuses grisâtres, sans fossiles ;
- Craie à silex : calcaire blanc et tendre stratifié de lits de silex noirs.

Les eaux de la tranche supérieure de la craie, en équilibre avec celle des alluvions, constituent une nappe à $K_h = K_v = 10^{-3}$ m/s qui se maintient légèrement plus haut que le niveau de la Seine, soit en période normale vers 27 m NGF. La nappe est en relation plus ou moins directe avec la Seine. Les niveaux d'eau observés peuvent donc s'élever ou s'abaisser selon le battement saisonnier qui est lié à l'alimentation directe de la nappe par les eaux météoriques, et selon l'amortissement des ondes de crue de la Seine dans l'aquifère (figure 21).

Selon les données du Service de la Navigation, les niveaux des crues de la Seine ont atteint les cotes indiquées dans le tableau 1 au Pont de Billancourt, distant d'environ 500 m du site. La retenue normale de la Seine au droit de ce pont est de 26,39 m NGF.

Tableau 3: Cote atteinte par la Seine lors de trois crues historiques.

Année de crue	Période de retour	Altitude au Pont de Billancourt
1910	100 ans (crue exceptionnelle)	31,68 m NGF
1955	50 ans	30,80 m NGF
1970	10 ans	29,46 m NGF

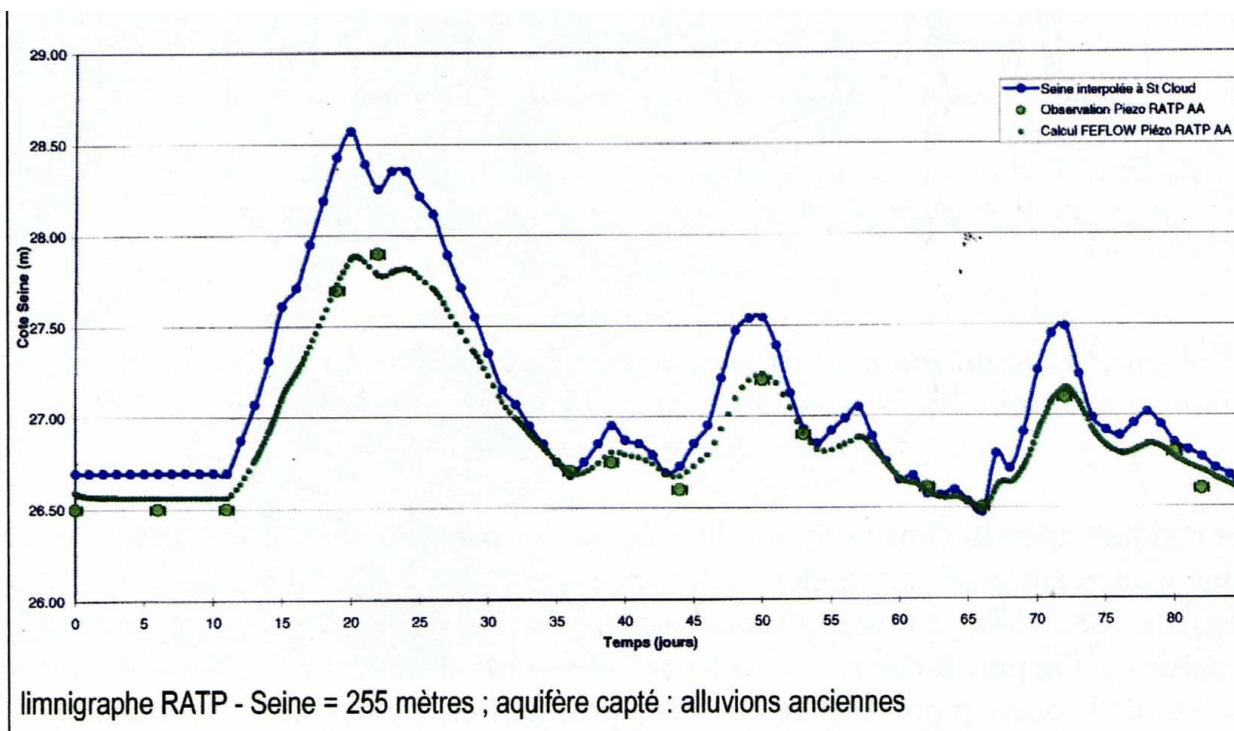


Figure 21 : Site Rhin et Danube à Boulogne-Billancourt. Onde de crue mesurée et onde de crue restituée par un modèle.

La commune a fait l'objet à plusieurs reprises d'arrêtés de catastrophe naturelle du fait d'inondation par crue de la Seine, par ruissellement ou coulée de boue. Le site du projet se trouve hors de la zone inondable de la Seine et en zone d'aléa « moyen » vis-à-vis du risque de remontée de nappe (figure 22).

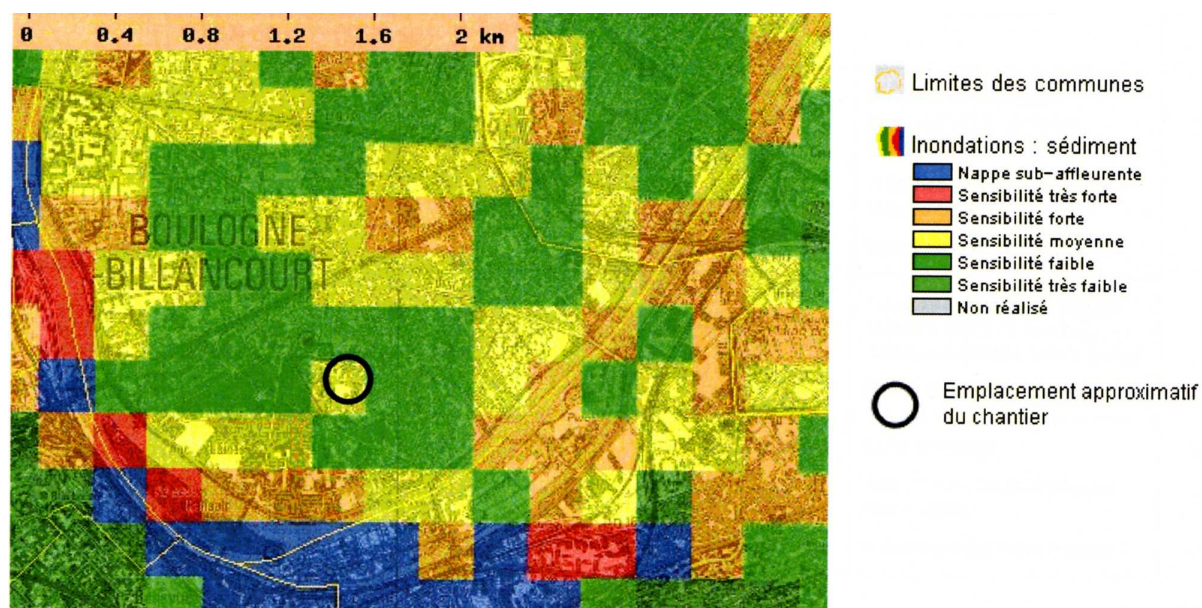


Figure 22 : Extrait de la carte du risque d'inondation par crue de nappe.

5.2 Réalisation du projet de bâtiment

La réalisation du projet conduira à la réalisation d'une fouille, principalement dans les alluvions anciennes. Des fondations superficielles seront alors mises en place, du type semelles filantes (épaisseur supérieure à 0,5 m) ou isolées (épaisseur supérieure à 0,7 m), ancrées dans la couche des alluvions d'au moins 50 cm au-delà du fond de fouille et du niveau remanié par les travaux de terrassement. Le niveau d'assise prévisionnelle des fondations devrait donc se situer à 5,50 m de profondeur par rapport au TN, soit à la cote 28,80 m NGF.

Le contrôle du niveau piézométrique est obligatoire avant travaux pour vérifier que l'on est dans une période favorable. Le 8 juin 2007, le niveau de la nappe se trouve à 8,07 m de profondeur par rapport au terrain naturel (TN) actuel, soit à 26,23 m NGF. La fouille du projet n'atteindra pas la nappe dans les conditions du mois de juin 2007 et elle sera donc réalisée à sec. Pourtant, un système de rabattement de la nappe est à prévoir en phase chantier car celle-ci pourrait monter de façon impromptue lors des travaux. Le pompage en pleine fouille étant interdit (débit trop fort qui risque de déstabiliser les parcelles mitoyennes ou d'entraîner des fines), le rabattement s'effectuera au moyen de pointes ou de puits filtrants à l'intérieur de la fouille. Un béton résistant aux eaux agressives chimiquement est recommandé pour la confection des fondations.

Le niveau des plus hautes eaux (NPHE) est situé à 2,60 m de profondeur (soit 31,70 m NGF environ) par rapport au TN. La position du sous-sol inférieur rend donc ce dernier inondable par une remontée de nappe en cas de crue décennale. Un système de protection permanent contre l'eau devra être mis en place. Voici des solutions possibles :

- Sous-sol étanche avec un cuvelage mis en œuvre jusqu'à la cote 32,18 m NGF ($= 31,68 + 0,50$ m) dimensionné pour résister à la pression d'eau, ainsi que le dallage.
- Sous-sol drainé : entouré de barbacanes et de cunettes périmétriques associées à un tapis drainant en sous-face du dallage. Ce système est efficace pour une faible remontée de la nappe (0,5 m) au-dessus du niveau inférieur du sous-sol mais la présence de traces d'humidité n'est pas à exclure, au moins à cause de la capillarité.
- Sous-sol inondable : au-delà de 0,5 m de remontée de nappe par rapport au dallage du sous-sol inférieur et dans le cas d'une remontée rapide de l'eau, il faut prévoir des événements pour faciliter l'entrée de l'eau dans le sous-sol et éviter la surpression autour des fondations.

Les abords du bâtiment doivent être conçus de façon à éloigner les eaux de ruissellement des toitures et façades.

Cet exemple montre que la prise en compte de l'aléa remontée de nappe dans le domaine de la construction de bâtiments reste dans le cadre habituel des fluctuations saisonnières ou interannuelles associées à la météorologie. Elle ne considère pas le risque d'une remontée du niveau de référence de la nappe, ou du niveau moyen, qui apparaîtrait suite au changement d'usage des quartiers cibles : de l'abandon d'établissements industriels à la création d'immeubles de bureaux ou d'installations de loisirs moins consommateurs d'eau de nappe.

5.3 Réinjection des eaux d'exhaure : exemple du projet Mozart

Le raccord au réseau d'assainissement des pompages permanents installés pour dénoyer les ensembles immobiliers représente un apport important aux stations d'épuration. La méthode alternative à développer est la réinjection des eaux d'exhaure sur le pourtour des fondations (figure 23) des immeubles nouvellement construits, comme cela a été mis en œuvre sur le

projet Mozart (tour de 23 étages) qui est venu achever la rénovation complète sur 20 ans de la plaine d'Issy-les-Moulineaux, initialement industrielle, aujourd'hui à usage tertiaire ou d'habitation.

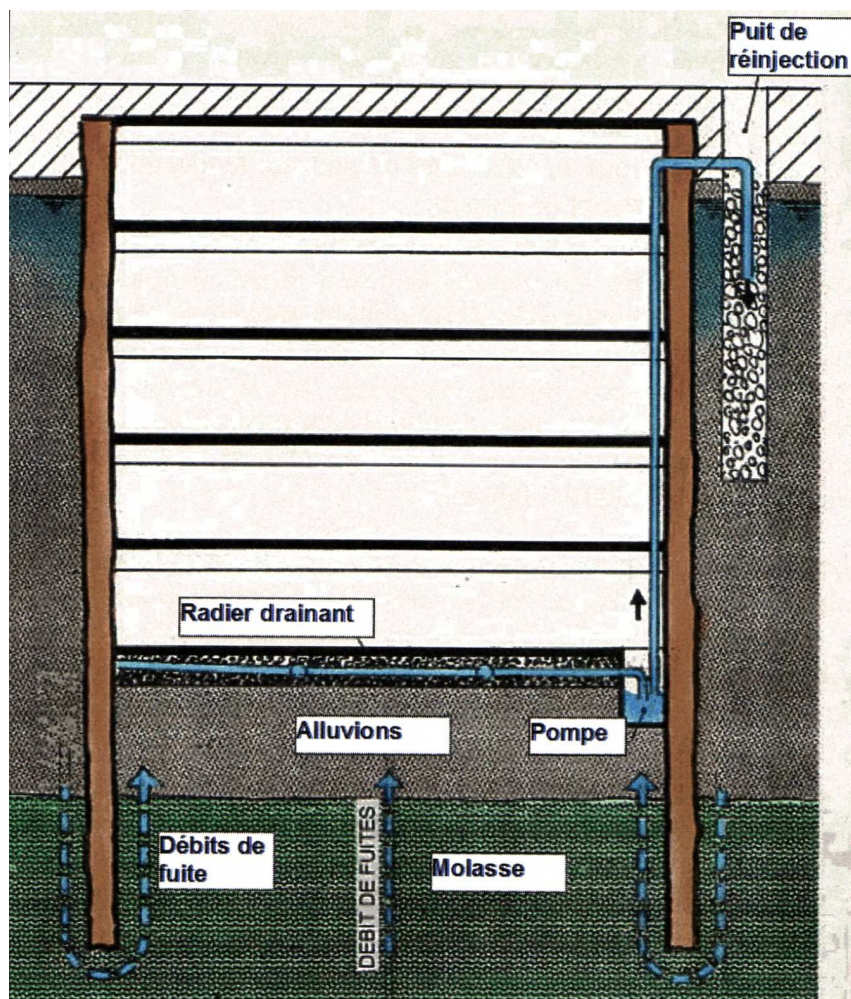


Figure 23 : Schéma type du radier drainant et de la réinjection.

L'aquifère d'alluvions sur craie y est très productif (transmissivité de l'ordre de $5.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$). Les trois niveaux de sous-sols de la tour EDF construite sur ce site en 1971, dont le radier inférieur est actuellement noyé sous 3 m de nappe, seront conservés dans la nouvelle tour Mozart. La construction s'était déroulée en 1971 sous un pompage de $5000 \text{ m}^3/\text{h}$, ce qui peut expliquer pourquoi les alluvions sont particulièrement crues (pauvres en fines) d'après les sondages actuels.

En revanche, en 2007 a été faite une enceinte périmétrique aux trois niveaux de sous-sols existants, au moyen de techniques diverses (là où c'est possible, paroi au coulis non armé dite molle, sinon colonnes de *jet grouting* prolongées par des lignes d'injection profondes), enceinte ancrée à 25 m de profondeur (-10 m NGF) sous les alluvions anciennes, dans une couche de craie beaucoup moins perméable que la craie fissurée sus-jacente (Monnier, 2007). Cela a permis de limiter le débit global de pompage résiduel à $107 \text{ m}^3/\text{h}$ pour le rabattement contractuel (6,55 m) en situation de nappe basse, ou $146 \text{ m}^3/\text{h}$ pour le rabattement (8,95 m) en nappe haute (crue quinquennale, dite « crue chantier »), soit environ la moitié de ce qui avait été calculé au moyen d'un modèle FeFlow sur la foi d'essais au micromoulinet et d'une

hypothèse pessimiste quant à l'étanchéité du rideau d'injections (5.10^{-6} m/s) et à la faible perméabilité (5.10^{-6} m/s) de la craie inférieure.

Le calage du modèle a été effectué grâce au suivi de l'onde de crue (figure 21) de la Seine à la nappe qui a permis de définir les valeurs de colmatage du fleuve (Béraud et Clouet d'Orval, 1976), K/e avec K la perméabilité de la couche colmatante et e son épaisseur : la valeur trouvée est 3.10^{-6} s^{-1} pour un tronçon du fleuve au droit d'Issy-les-Moulineaux, et aucun colmatage sur le reste du linéaire (transmission hydraulique parfaite entre la nappe et le fleuve). Afin d'optimiser ce paramètre, un recensement complet a été fait des modes de confortement des berges du fleuve (palplanches, murs de quais, état naturel).

La modélisation numérique a permis de définir les cotes des niveaux des plus hautes eaux souterraines, cotes dimensionnantes pour le projet. La cote de protection de 30 m NGF a été retenue pour la partie de Mozart sur la commune d'Issy. Cette cote correspond à la conjonction d'une crue de Seine cinquantennale, d'un battement saisonnier de nappe de 0,2 m, et de l'arrêt de tous les pompages existant dans les environs du site (Monnier, 2007). La modélisation a permis également de définir l'impact hydrogéologique (carte piézométrique) du pompage et de la réinjection de l'eau d'exhaure à proximité et à distance de l'enceinte, ce qui est nécessaire pour instruire le dossier Loi sur l'eau (code de l'environnement).

6. Impact des nappes sur les réseaux

Les apports d'eau de ruissellement croissant au rythme de l'accroissement des surfaces imperméabilisées raccordées aux réseaux de collecte, les inondations par débordement de réseau se sont faites plus nombreuses. L'enjeu des techniques alternatives fondées sur l'infiltration des EP dans le terrain est donc de limiter le ruissellement pour éviter la saturation des réseaux et réduire le coût imputable aux inondations. Cependant, il faut s'assurer que les eaux infiltrées ne vont pas polluer une nappe considérée comme une ressource d'eau potable, et il est donc conseillé, avant de mettre en place des dispositifs d'infiltration, de réaliser d'abord une carte de vulnérabilité de la nappe en tant que ressource et là où un captage existe, de déterminer le *Bassin d'alimentation de captage* (BAC). Par ailleurs, la multiplication des surfaces aménagées pour l'infiltration pourrait rompre l'équilibre hydrodynamique et provoquer localement une remontée de nappe qui risque d'affecter les réseaux enterrés.

6.1 Les eaux claires parasites permanentes (ECPP)

Un réseau endommagé peut subir l'entrée intempestive d'eaux claires parasites permanentes qui aggravent la dégradation des joints et contribuent à l'usure voire à une érosion des ouvrages.

L'essentiel de ces ECPP sont vraisemblablement des eaux de pluie ou de fuites d'AEP infiltrées dans le sol puis drainées par le massif de sable et gravier qui entoure les conduites d'assainissement, ce qui leur permet d'entrer dans le réseau dès qu'elles y trouvent une faille. Cela peut être aussi dans certains cas de l'eau de nappe lors du battement saisonnier ou d'une remontée qui peut être exceptionnelle ou tendancielle. Une entrée d'eau (figure 24) a lieu dès que la nappe remonte suffisamment pour noyer le réseau par en-dessous et mettre en charge sa paroi extérieure, ou que le taux d'infiltration par le haut à travers le terrain sus-jacent est localement élevé. De plus, l'entrée d'eau par une fissure ou un joint dans un réseau favorise ensuite le développement racinaire des végétaux (figure 25) qui achève de déstructurer l'ouvrage endommagé.



Figure 24 : Infiltration d'eau claire parasite permanente (ECPP) dans un réseau d'assainissement.

On cherche à identifier les ECPP grâce à des mesures au cours du *Schéma directeur d'assainissement (SDA)*. On estime qu'en moyenne, 30 % des eaux qui parviennent aux stations d'épuration sont des ECPP, ce qui implique un surcoût important lors du traitement.

Par ailleurs, le raccord au réseau des pompages permanents installés pour dénoyer les ensembles immobiliers représente un apport important aux stations. Ces eaux d'exhaure sont relativement saines et peuvent donc être considérées comme des ECPP. La méthode alternative à développer est la réinjection des eaux d'exhaure (Bize et al., 1972) sur le pourtour des fondations des immeubles nouvellement construits, comme cela a été mis en œuvre sur le projet Mozart (tour de 23 étages).



Figure 25 : Système racinaire pénétrant dans une conduite d'assainissement.

6.2 Infiltrabilité des eaux pluviales (EP)

Le *Zonage d'assainissement EP* (soumis à enquête publique) définit les secteurs en mode de collecte et de gestion des eaux, soit à la parcelle soit en réseau, et prévoit d'autoriser ou d'interdire l'infiltration selon la nature des sols.

Le *Règlement d'assainissement* peut aussi modifier les pratiques en recommandant une étude de sol en fonction du projet.

Toutes les prescriptions auront une incidence sur l'avis du *permis de construire* mentionnant la gestion générale des EP, par exemple le devenir des eaux de toiture gérées à la parcelle, en

fonction de la capacité d'infiltration du sol, de la configuration de la parcelle et de l'espace disponible, ou de l'intérêt paysager du secteur.

La réutilisation des EP des bâtiments peut représenter une économie énergétique et environnementale en investissement comme en fonctionnement et à ce titre, fait partie de la démarche Haute qualité environnementale (HQE). Les enjeux de la gestion des EP correspondent à quatre cibles de la démarche HQE : gestion de l'eau (cible 5), qualité de l'eau (cible 14), choix intégré des procédés de construction (cible 2) et gestion de l'entretien et de la maintenance (cible 7).

L'avantage des systèmes aériens (noues, mares-tampon...) sur les systèmes enterrés (tranchées d'infiltration) est d'être moins coûteux à mettre en œuvre et de permettre une surveillance permanente et un entretien facile (tonte...).

6.3 Une carte d'infiltrabilité des eaux pluviales (EP) en Seine-Saint-Denis

Le concept que nous appellerons « injection et infiltration dirigée » ne repose pas sur une infiltration immédiate, mais sur la mise en œuvre d'un volume de rétention qui correspond à une pluie de 36 mm. Il pourra s'agir de noues, de fossés, d'éléments circulaires en béton, etc. Ce principe ne nécessite donc pas la présence d'une perméabilité importante mais demande cependant la réalisation d'essais préalables.

L'étude (Fouché et Hirschauer, 2007) s'est appuyée sur la carte géologique dressée par le BRGM, affinée à l'aide des sondages issus de la base de données ACCESSGEO du LREP. Cette carte, associée au faciès des couches a permis de définir les zones pour lesquelles un ajout d'eau ponctuel peut engendrer des désordres à caractère géotechnique. Il s'agit :

- de tous les horizons gypseux pour lesquels un lessivage d'eau non saturée en sulfates peut engendrer des cavités à court terme (quelques années) : les eaux pluviales sont exemptes de sulfate et par conséquent, très agressives par rapport à ce minéral ; rappelons que le gypse est soluble dans l'eau à raison de 2,2 g/l ; cette propriété est largement démontrée à l'occasion de fuites de réseaux qui, dans le cas de conduite d'eau en particulier, génèrent rapidement des cavités (échelle de temps : l'année).
- des versants qui, outre la présence de sols argileux instables car un accroissement de la pression interstitielle dans les argiles augmente le risque de glissement et de résurgence incontrôlée à l'aval, sont entaillés par des carrières de gypse à ciel ouvert et souterraines ;
- des carrières souterraines qui sous minent les plateaux, surtout le plateau d'Avron.

Nous avons séparé deux familles d'ouvrages d'infiltration dont le comportement sera de nature physique différente. Par convention, ces deux familles sont :

- les ouvrages d'infiltration intéressent les terrains superficiels : puisards, noues, bassins d'infiltration employés pour infiltrer les eaux dans des sols non saturés. Par sécurité, de tels ouvrages devront être distants d'au moins 5 m des bâtiments (l'entraînement de particules peut générer de faibles tassements ponctuels autour de l'ouvrage) ;
- les ouvrages d'injection : il s'agit de puits forés profonds descendus jusqu'aux sables de Beauchamp dans la Plaine de France ou jusqu'au substratum dans la vallée de la Marne. Ces ouvrages ponctuels dont la profondeur peut atteindre 10 à 20 m intéressent des horizons très perméables situés sous la nappe et par définition des sols saturés dont l'hydrodynamique est connue. Ces ouvrages sont utiles en cas d'emprise foncière limitée.

Le zonage proposé ne tient pas compte de la présence de remblais dans lesquels l'infiltration est déconseillée, ce qui signifie que l'infiltration ne peut être mise en œuvre qu'en-dessous de ceux-ci. Quatre zones ont été délimitées :

- a) Infiltration et injection proscrites ;
- b) Infiltration superficielle proscrite mais injection autorisée par puits forés dans les Alluvions Anciennes de la Marne et/ou dans le Marno-calcaire de Saint-Ouen ;
- c) Infiltration autorisée dans les terrains superficiels et injection profonde proscrite ;
- d) Infiltration superficielle et injection profonde autorisées dans le marno-calcaire de Saint-Ouen et les Alluvions Anciennes de la Marne.

L'étude réalisée a permis d'évaluer la faisabilité géotechnique de l'injection et de l'infiltration dirigée des eaux pluviales dans les sols sur l'ensemble du département de la Seine-Saint-Denis. La cartographie proposée correspond à notre connaissance des sites qui peut s'améliorer et au contexte réglementaire qui évoluera en fonction de l'édition des PPR mouvements de terrain.

7. Conclusions

Les perturbations du régime d'écoulement souterrain en milieu urbain sont à la fois complexes et différées par rapport à leurs causes. Les changements passés en revue ici sont relatifs à l'état et à l'usage antérieur du sol. On a décrit leur effet boomerang : ils impactent la stabilité et l'intégrité des installations urbaines. Parmi les structures affectées par la remontée tendancielle de nappe ou par la crue de nappe, on trouve les fondations et les espaces souterrains des bâtiments, les chaussées, tunnels routiers et tranchées couvertes, les équipements d'assainissement comme les collecteurs, stations de relevage, puisards, fosses septiques, etc. Le battement de nappe engendre des sollicitations cycliques qui dégradent les structures souterraines et produisent l'entrée d'eaux claires parasites dans les réseaux et l'inondation des parkings. On doit désormais envisager la situation où la nappe (masse d'eau souterraine) principale s'élève à tel point que si tous les pompages d'alimentation cessaient (réduction de la demande en période de crise économique, qualité diminuée en dessous du tolérable), le niveau piézométrique dépasserait le niveau antérieur au développement industriel. C'est pourquoi une cartographie du risque remontée de nappe est appelée à se développer.

Bibliographie

- Accès aux données sur les eaux souterraines (ADES). Base de données quantitatives et qualitatives : <http://www.adeseaufrance.fr>.
- Banque des données du sous-sol (BSS). Informations brutes géologiques et techniques relatives à des ouvrages souterrains déclarés par application du Code minier : <http://infoterre.brgm.fr>.
- Béraud J-F., Clouet d'Orval M. (1976). Détermination du colmatage du lit d'une rivière en relation avec une nappe souterraine. *Bulletin du BRGM*, **2-III**-(3/4).
- Berger G. et Marquet (1983). Etude de l'évolution piézométrique des nappes d'eau souterraine à Paris et en proche banlieue, rapport du BRGM.
- Bize J., Bourguet L., Lemoine J. (1972). *L'alimentation artificielle des nappes souterraines*. Masson, Paris, France, 199 p.
- Delesse M. (1862). Carte hydrogéologique du département de la Seine.
- Diffre P. (1969). *Hydrogéologie de Paris et de sa banlieue*. Thèse de doctorat de la Faculté des Sciences de l'Université de Paris.
- Fouché O., Hirschauer A. (2007). Variations de la nappe phréatique et cartographie de l'infiltrabilité des sols sur le territoire de la Seine-Saint-Denis. *Proc. 14^{èmes} Journées techniques du Comité français d'Hydrogéologie*, Lyon, 8-10 nov. 2007, p 63-88.
- Monnier G. (2007). Le projet Mozart à Paris (75) et Issy-les-Moulineaux (92) : hydrogéologie, fondations profondes et réglementation. *Proc. 14^{èmes} Journées techniques du Comité français d'Hydrogéologie*, Lyon, 8-10 nov. 2007, p 21-31.
- Wojtkowiak F., Baudron J-C., Cattaert P., Vassiliadis G. (2002). Maîtrise de l'impact hydraulique, sur le bâti de surface, de l'ennoyage de mines arrêtées du bassin ferrifère lorrain (France). *Proc. 9th Congress of IAEGE, Engineering Geology for Developing Countries*, 16-20 sept. 2002, Durban, Afrique du Sud, p. 2410-2419.

JSE-Instructions-2009.doc (version du 7 avril 2009)